



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Kimmo Lähdesmäki

**RAKETERM-JULKISIVUELEMENTILLÄ VERHOTTUJEN
ULKOSEINÄRAKENTEIDEN RAKENNUSFYSIKAALINEN
TOIMINTA**

Diplomityö

Ohjaaja: professori Ralf Lindberg
Tampere 2009

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

LÄHDESMÄKI, KIMMO: Raketerm-julkisivuelementillä verhottujen ulkoseinärakenteiden rakennusfysikaalinen toiminta

Diplomityö, 100 sivua, 16 liitesivua

Maaliskuu 2009

Pääaine: Rakennetekniikka

Tarkastajat: professori Ralf Lindberg (TTY), tekn. toht. Juha Vinha (TTY) ja toimitusjohtaja Ants Katkosild (AS Rake)

Avainsanat: Rakennusfysiikka, lämpö, kosteus, ulkoseinärakenne, laboratorionkokeet

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää Raketerm-julkisivuelementillä verhottujen ulkoseinärakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa laboratoriossa tehtävillä seinärakennekokeilla. Kokeissa tutkittiin yhteensä yhdeksän erilaisen seinärakenteen toimivuutta syys-, talvi- ja kevätolosuhteissa.

Raketerm-julkisivuelementti on tiililaattapintainen elementti, jonka taustana on polyuretaanin ja -styreenin seoksesta tehty lämmöneristekerros. Julkisivuelementin noin 37 mm:n paksuinen lämmöneristekerros muodostaa rakenteen ulkopintaan melko vesihöyrytiivin kerroksen, mikä aiheuttaa haasteen koko rakenteen rakennusfysikaaliselle toiminnalle. Lähtökohtana tutkimukselle oli, että ulkoseinärakenteet voitaisiin yleisesti tehdä umpirakenteina, jolloin Raketerm-elementissä olevaa lämmöneristekerrosta voitaisiin hyödyntää täysimääräisesti laskettaessa seinärakenteen U-arvoa. Tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli lisäksi saada tietoa myös erilaisista ulkoseinärakenteen tuuletusratkaisuista. Tuuletusratkaisun tuli olla sellainen, että tuuletuksen ulkopuolelle jäävää Raketerm-elementin lämmöneristettä voitaisiin ainakin osittain hyödyntää U-arvolaskuissa.

Tämän tutkimuksen mukaan Raketerm-elementillä verhotut tuulettumaton ulkoseinärakenne voi toimia rakennusfysikaalisesti melko hyvin, jos rakenteen sisäpinnassa on riittävän suuri vesihöyrynvastus. Suositeltavampaa kuitenkin on, että Raketerm-elementillä verhotut ulkoseinärakenteet tehdään tuulettuvina. Yhtenäisellä, ns. perinteisellä tuuletusvälillä varustettu seinärakenne toimii kosteusteknisesti parhaiten, mutta silloin Raketerm-elementin lämmöneristekerrosta ei voida hyödyntää laskettaessa rakenteen U-arvoa. Kokeiden perusteella julkisivuelementin taustapintaan tehdyllä tuuletusurituksella rakenteesta poistuu myös riittävästi kosteutta. Tuuletusuritusratkaisussa myös Raketerm-elementin lämmöneristekerrosta voidaan käyttää hyödyksi laskettaessa koko rakenteen U-arvoa. Lämpö- ja kosteusteknisesti optimaalisen tuuletusurituksen määrittäminen vaatii sekä laskennallisia, että kokeellisia rakennusfysikaalisia tutkimuksia.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Tampere, Finland

Master's Degree Programme in Civil Engineering

LÄHDESMÄKI, KIMMO: Building physical behaviour of external wall structures with Raketerm facade panels

Master of Science Thesis, 100 pages, 16 Appendix pages

March 2009

Major: Structural Engineering

Examiner: Professor Ralf Lindberg (TUT), Dr. Tech. Juha Vinha (TUT) and Managing Director Ants Katsosild (AS Rake)

Keywords: Building physics, temperature, moisture, external wall, laboratory test

The objective of this research was to examine the building physical behaviour of external wall structures with Raketerm facade panels. Nine different external wall structures were studied in the laboratory under different climate conditions.

The Raketerm facade panel is an insulated facade panel with a covering layer from clinker tiles. The insulation material is a mixture of polyurethane and polystyrene, and the thickness of the insulation layer is approximately 37 mm. The building physical performance of the wall structure is challenging due to the relatively high water vapour resistance of the insulation layer. The hypothesis made before conducting the research was that external wall structures with Raketerm facade panels could function without a ventilation layer on their back surface. In such a case, the entire insulation layer of the Raketerm facade panel could be taken into account when calculating the U-value of the wall structures. A further aim of the research was to discover information on the performance of different wall structure ventilation systems. An important criterion for the ventilation system in question was that the insulation layer in the Raketerm facade panel could at least partly be taken into account in the calculation of the U-value of the whole structure.

It was observed that external wall structures with Raketerm facade panels without ventilation performed relatively well if the water vapour resistance of the interior lining was sufficiently high. However, it is recommended that external wall structures with Raketerm facade panel are ventilated. The traditional ventilation gap provides the best hygrothermal performance for the whole structure, but in this case the insulation layer in the Raketerm facade panel cannot be taken into account in the U-value calculations. That said, an adequate amount of moisture was also transported by the ventilation systems used in the laboratory experiments. In this case, the insulation layer of the Raketerm facade panel can also be partly utilized in the U-value calculations. The hygrothermally optimum ventilation can only be determined by both mathematical simulation and experimental tests.

ALKUSANAT

Tämä tutkimus on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen diplomityönä professori Ralf Lindbergin johdolla. Tutkimuksen rahoittivat AS Rake ja TTY:n Rakennustekniikan laitos.

Kiitän professori Ralf Lindbergiä ja tekniikan tohtoria Juha Vinhaa työni ohjaamisesta ja sen tarkastamisesta. Toimitusjohtaja Ants Katkosildia AS Rakesta kiitän erityisesti mahdollisuudesta tehdä diplomityöni mielenkiintoisesta aiheesta.

Tomi Stranderia kiitän ennen kaikkea koeseinien rakentamisavusta laboratoriossa. Lisäksi haluan kiittää myös muita työkavereitani ja kaikkia niitä henkilöitä, jotka ovat auttaneet tutkimuksen valmistumisessa.

Kannustuksesta tämän tutkimuksen aikana sekä erityisen suuret kiitokset koko opiskelunaikaisesta tuesta haluan lausua vanhemmilleni, jotka ovat aina olleet tukena täyden kympin arvoisesti.

Katjalle erityiskiitos tutkimuksenkin aikana kodin eteen tehdystä työstä. Emilialle halit hengessä mukana elämisestä.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	I
Abstract	II
Alkusanat	III
Sisällysluettelo	IV
Merkinnät	VI
Termit ja niiden määritelmät	VII
1 JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet	1
1.3 Tutkimuksen suoritus	2
1.4 Tutkimuksen rajaukset	2
2 RAKENTEIDEN LÄMPÖTEKNISET PERUSTEET	4
2.1 Lämmön siirtymismuodot	4
2.1.1 Johtuminen	4
2.1.2 Säteily	6
2.1.3 Konvektio	8
3 RAKENTEIDEN KOSTEUSTEKNISET PERUSTEET	11
3.1 Kosteuden esiintyminen	11
3.1.1 Ilman kosteus	11
3.1.2 Materiaalin kosteus, tasapainokosteus ja hygroskooppisuus	12
3.2 Kosteuden siirtyminen rakenteessa	15
3.2.1 Kosteuden siirtyminen diffuusiolla	15
3.2.2 Kosteuden siirtyminen konvektiolla	17
3.2.3 Kosteuden kondensoituminen	19
4 ULKORAKENTEEN RAKENNUSFYSIKAALISEEN TOIMINTAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	21
4.1 Sisä- ja ulkoilman olosuhteet	21
4.2 Sisäilman kosteuslisä	23
4.3 Seinän vesihöyrynvastus	25
5 SEINÄRAKENTEIDEN RAKENNUSFYSIKAALISET KOKEET	27
5.1 Koelaitteisto	27
5.1.1 Säärasituslaitteisto	27
5.1.2 Mittauslaitteistot	29
5.2 Koeseinät ja koejärjestelyt	34
5.2.1 Raketerm-julkisivuelementti	34
5.2.2 Koeseinät ja lähtökohdat eri koe-erien rakenneratkaisuille	36
5.2.3 Koeseinien rakentaminen, säilytys ja asentaminen	39
5.2.4 Mitattavat suureet, mittauspaikat ja antureiden asennukset	41
5.2.5 Mitattujen suureiden epävarmuudet	42

5.2.6	Koeolosuhteet.....	42
5.2.7	Tutkimusajankohta.....	44
6	TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU.....	45
6.1	Yleistä	45
6.2	Koe-erä 1 (seinät 1A-1C).....	47
6.2.1	Rakenteiden lämpötilat	47
6.2.2	Vesihöyrypitoisuudet ja kosteuslisä.....	52
6.2.3	Suhteelliset kosteudet rakenteissa.....	54
6.2.4	Ilmavirtausmittaus.....	58
6.2.5	Lämpövirtalevymittaukset	59
6.3	Koe-erä 2 (seinärakenteet 2A-2C)	61
6.3.1	Rakenteiden lämpötilat	61
6.3.2	Vesihöyrypitoisuudet ja kosteuslisä.....	66
6.3.3	Suhteelliset kosteudet rakenteissa.....	68
6.3.4	Ilmavirtausmittaus.....	72
6.3.5	Lämpövirtalevymittaus	74
6.4	Koe-erä 3 (seinärakenteet 3A-3C)	75
6.4.1	Rakenteiden lämpötilat	75
6.4.2	Vesihöyrypitoisuudet ja kosteuslisä.....	82
6.4.3	Suhteelliset kosteudet rakenteissa.....	83
6.4.4	Ilmavirtausmittaukset.....	88
6.4.5	Lämpövirtalevymittaukset	89
7	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	91
8	YHTEENVETO	95
	LÄHTEET.....	97
	LIITTEET	100

MERKINNÄT

A	pinta-ala	m^2
G	kosteustuotto sisäilmaan	kg/h
R	lämmönvastus	$m^2 \cdot K/W$
T	lämpötila	K
ΔT	lämpötilaero	K
U	lämmönläpäisykerroin	$W/(m^2 \cdot K)$
V	tilavuus	m^3
Z_p	vesihöyrynvastus	$m^2 \cdot s \cdot Pa/kg$
Z_v	vesihöyrynvastus	s/m
d	paksuus	m
g	kosteusvirran tiheys	kg/($m^2 \cdot s$)
m	massa	g, kg
n	ilmanvaihtokerroin	1/h
p_v	vesihöyryn osapaine	Pa
r_a	ilmavirran tiheys	$m^3/(m^2 \cdot s)$
r_a	ilman virtausnopeus	m/s
t	aika	s
t	lämpötila	$^{\circ}C$
Δt	lämpötilaero	$^{\circ}C$
q	lämpövirran tiheys	W/m^2
w, u	kosteuspitoisuus	kg/m ³
Φ	lämpövirta	W
α	absorptiokerroin	-
ε	emissiviteetti	-
δ_p	vesihöyrynläpäisevyys	kg/($m \cdot s \cdot Pa$)
δ_v	vesihöyrynläpäisevyys	m^2/s
φ	ilman suhteellinen kosteus (RH)	%
λ	lämmönjohtavuus	$W/(m \cdot K)$
ρ	heijastuskerroin	-
τ	läpäisykerroin	-
v	vesihöyrypitoisuus	kg/m ³ , g/m ³
Δv	vesihöyrypitoisuusero	kg/m ³ , g/m ³
σ	Stefan-Bolzmännin säteilyvakio ($5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$)	$W/(m^2 \cdot K^4)$

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Diffuusio	Kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa olevia yksittäisen kaasun pitoisuuseroja (tai osapaine-eroja). Diffuusiossa kaasu siirtyy korkeammasta pitoisuudesta alempaan pitoisuuteen.
Emissiviteetti	Emissiviteetti kuvaa pinnan kykyä lähettää lämpösäteilyä ns. mustaan vertailukappaleeseen verrattuna samassa lämpötilassa. Musta kappale lähettää eniten lämpösäteilyä, jolloin sen emissiviteetti on 1,0. Emissiviteetti vaihtelee välillä 0...1.
Hygroskooppisuus	Tarkoittaa huokoisen aineen kykyä sitoa itseensä kosteutta ilmasta ja luovuttaa sitä takaisin ilmaan.
Johtuminen	Johtumisessa lämpöenergia siirtyy molekyylien liike-energiana molekyylistä toiseen. Johtuminen on ainoa lämpöenergian siirtymismuoto kiinteissä aineissa.
Kondensoituminen	Tarkoittaa vesihöyryn tiivistymistä rakenteiden pintoihin vedeksi tai jääksi, kun ilman vesihöyrypitoisuus on saavuttanut pinnan lähellä olevan kyllästyskosteuden (suhteellinen kosteus on 100 % RH).
Konvektio	Konvektiossa kaasu tai neste virtaa ulkopuolisen voiman (pakotettu konvektio) tai lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen (luonnollinen konvektio) vaikutuksesta. Lämpöenergia siirtyy virtaavan aineen mukana.
Kosteus	Kosteus tarkoittaa kemiallisesti sitoutumatonta vettä kaasumaisessa, nestemäisessä tai kiinteässä olomuodossa.
Kosteuslisä	Kosteuslisä tarkoittaa sisäilman kosteuspitoisuuden ja ulkoilman kosteuspitoisuuden erotusta.
Kosteuspitoisuus	Aineessa oleva kosteusmäärä ilmoitettuna kiloina kuutiota kohden (kg/m^3) tai kilona kuivaa ainetta kohden (kg/kg).

Lämmönjohtavuus	Lämmönjohtavuus, λ , ilmoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen lämpötilaero on yksikön suuruinen. Yksikkö ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$).
Lämmönläpäisykerroin	Lämmönläpäisykerroin, U , ilmoittaa lämpövirran, joka stationääritilassa (jatkuvuustilassa) läpäisee aikayksikössä (s) pintayksikön (m^2) suuruisen rakennusosan, kun lämpötilaero (K) rakennusosan eri puolilla olevien ilmatilojen välillä on yksikön suuruinen. Yksikkö ($\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$).
Lämmönvastus	Lämmönvastus, R , ilmoittaa rakennusosan tai - ainekerroksen lämmönsiirtymisvastuksen. Lämmönvastus lasketaan kaavalla $R = d/\lambda$. Yksikkö ($\text{m}^2/(\text{K}\cdot\text{W})$).
Suhteellinen kosteus	Ilmoittaa kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä kyllästyskosteuspitoisuuteen verrattuna tietyssä lämpötilassa. Yksikkö % RH.
Stationääritila	Tarkoittaa jatkuvuustilaa, jossa systeemiin tuodaan ja sieltä poistuu vakiomäärä ainetta tai esimerkiksi lämpöenergiaa samassa ajassa. Stationääritilassa lämpötilat ja eri aineiden pitoisuudet ovat saavuttaneet tasapainotilan eivätkä muutu ajan kuluessa.
Säteily	Säteilyssä lämpöenergia siirtyy sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä valon nopeudella. Säteilylämmönsiirto ei tarvitse väliainetta ja se on tehokkainta tyhjiössä.
Tasapainokosteus	Kosteusmäärä, joka on sitoutunut materiaaliin tietyssä ympäristön kosteuspitoisuudessa ja lämpötilassa.
Vesihöyry	Tarkoittaa vettä kaasumaisessa olomuodossa.
Vesihöyryn diffuusio	Vesihöyryn diffuusio tarkoittaa kaasuseoksessa (esim. ilma) vakiopaineessa tapahtuvaa vesihöyrymolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksen vesihöyrypitoisuus- tai vesihöyryn osapaine-eroja.

Vesihöyryn konvektio	Vesihöyryn konvektio tarkoittaa kaasuseoksen sisältämän vesihöyryn siirtymistä kaasuseoksen mukana sen liikkuesssa kokonaispaine-eron vaikutuksesta.
Vesihöyrynläpäisevyys	Vesihöyrynläpäisevyys (δ_v tai δ_p) ilmoittaa vesimäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pintayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen vesihöyrypitoisuuksien (tai vesihöyryn osapaine-erojen) ero on yksikön suuruinen. Yksikkö on $\delta_v = \text{m}^2/\text{s}$ tai $\delta_p = \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$.
Vesihöyrynvastus	Vesihöyrynvastus (Z_v tai Z_p) ilmaisee tasapaksun ainekerroksen tai tällaisista muodostuvan tasapaksun kerroksellisen rakenteen vastakkaisilla pinnoilla vallitsevien vesihöyrypitoisuuksien tai vesihöyryn osapaineiden eron ja ainekerroksen tai rakenteen läpi jatkuvuustilassa pinta-alayksikköä kohti diffundoituvan vesihöyryvirran.
Vesihöyryn osapaine	Ilmoittaa ilmassa olevan vesihöyryn paineen (p_v).
Vesihöyrypitoisuus	Ilmoittaa ilmassa olevan vesihöyrymäärän (v). Ilmassa olevan vesihöyryn määrä voidaan ilmoittaa joko vesihöyrypitoisuutena tai vesihöyryn osapaineena. Vesihöyrypitoisuuksien ero pyrkii tasoittumaan diffuusiolla.

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

As Rake on kehittänyt ulkoseinien julkisivuverhouksiin tarkoitetun Raketerm-elementin. Raketerm-elementti koostuu pääasiassa kovasta lämmöneristekerroksesta ja ulkopinnassa olevasta tiililaattapinnasta. Raketerm-elementin on tarkoitus toimia julkisivussa sekä pintamateriaalina että osittaisena lämmöneristeenä. Raketerm-elementti on tarkoitettu käytettäväksi sekä uudis- että korjausrakentamisessa käyttötarkoituksiltaan erilaisissa rakennuksissa aina pientaloista julkisiin rakennuksiin.

Raketerm-elementti on ollut käytössä AS Raken kotimaassa Virossa jo muutamia vuosia. Tulevaisuudessa Raketerm-elementtiä olisi tarkoitus käyttää myös Suomessa. Suomen ilmasto-olosuhteet ovat ulkoseinän rakennusfysikaalista toimivuutta ajatellen vaativammat kuin Viron ilmasto-olosuhteet. Rakennusfysikaalisilla kokeilla on mahdollisuus selvittää rakenteen toimivuutta Suomen ilmasto-olosuhteissa. Erityisen mielenkiinnon kohteena on Raketerm-elementissä olevan lämmöneristekerros, joka muodostaa melko suuren vesihöyrynvastuksen lähelle ulkoseinärakenteen ulkopintaa.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen päätavoitteena oli tuottaa tietoa Raketerm-julkisivuelementillä verhottujen seinärakenteiden rakennusfysikaalisesta toiminnasta keskimääräisissä suomalaisissa syys-, talvi- ja kevätolosuhteissa. Syksyjakson tarkoituksena oli kertoa, miten ja kuinka nopeasti rakenteeseen kertyy kosteutta. Talvijaksolla tarkasteltiin pääasiassa mahdollisesti rakenteeseen kondensoituvaa kosteutta ja kevätjakson tarkoituksena oli antaa tietoa rakenteen kuivumiskyvystä. Tutkimuksen edetessä saatujen tulosten perusteella oli tavoitteena edelleen kehittää tutkittavia koerakenteita, jos niissä havaittiin rakennusfysikaalisesti tarkasteltuna puutteita.

Alkuperäisenä tutkimuksen tavoitteena oli tutkia ainoastaan umpirakenteita eli sellaisia rakenteita, joissa Raketerm-elementin ja varsinaisen seinärakenteen välissä ei olisi tuuletusväliä lainkaan. Tällöin Raketerm-elementissä olevaa lämmöneristettä voitaisiin käyttää täysimääräisesti hyväksi laskettaessa ulkoseinärakenteen lämmönläpäisyarvoa (U-arvoa). Jos ulkoseinärakenteet eivät kokeiden perusteella toimisi ilman tuuletusrakoa, tutkimuksen osatavoitteena oli tutkia rakenteen erilaisia tuuletusratkaisuja, joiden avulla rakenteeseen mahdollisesti liiallisessa määrin kertyvä

kosteus poistettaisiin. Tuuletusratkaisun tulisi olla sellainen, että tuuletusraon ulkopuolelle jäävää Raketerm-elementin lämmöneristettä voitaisiin ainakin osittain käyttää hyödyksi seinä rakenteen lämmönläpäisyarvoa laskettaessa. Tämä edellyttää sitä, että tuuletusraossa liikkuvan ilman virtausnopeus on riittävän pieni.

Tutkimuksen yhtenä osatavoitteena oli saada lähtötietoja myöhemmin tehtäviä tutkimuksia varten. Tällaisia tutkimuksia olivat Raketerm-elementillä verhottujen seinä rakenteiden U-arvokokeet sekä laskennalliset rakennusfysikaaliset tarkastelut erilaisille Raketerm-elementillä verhotuille seinä rakenteille. U-arvokokeet ja rakennusfysikaaliset laskentatarkastelut eivät sisällyneet tähän tutkimukseen.

1.3 Tutkimuksen suoritus

Tämä tutkimus koostuu pääasiassa Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitoksen säärasituslaitteistossa tehdyistä seinä rakenteiden rakennusfysikaalisista kokeista ja niistä saaduista tulosten tarkasteluista. Tutkimus käsittää kolme erillistä rakennusfysikaalista koetta (koe-erät 1-3), joista jokaisessa tutkittiin kolme erilaista seinä rakennetta. Yhteensä tutkittavia seinä rakenteita oli siten yhdeksän kappaletta.

1.4 Tutkimuksen rajaukset

Kokonaisille seinä rakenteiden rakennusfysikaalisille kokeille ei ole olemassa standardia, jonka mukaan kokeet tulisi tehdä. Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitoksella aiemmin tehtyjen useiden rakennusfysikaalisten seinä rakennekokeiden perusteella on kuitenkin havaittu, että tässäkin tutkimuksessa käytettyjen olosuhteiden avulla voidaan arvioida seinä rakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa suomalaisissa syys-, talvi- ja kevätolosuhteissa melko tarkasti ja luotettavasti. Saatujen tulosten perusteella tehtäville arvioille seinä rakenteiden rakennusfysikaalisesta toiminnasta ei ole kuitenkaan olemassa raja-arvoja ja määritelmiä esimerkiksi siitä, kuinka korkealle seinä rakenteen suhteellinen kosteus voi nousta ja kuinka pitkään tietyt olosuhteet seinä rakenteen sisällä sallitaan, jotta rakenteen voidaan ajatella toimivan moitteettomasti suunnitellun käyttöiän. Tässä tutkimuksessa arviointia rajattiin siten, että rakenteiden ei katsottu toimivan rakennusfysikaalisesti riittävän hyvin, jos rakenteen huokosilman suhteellinen kosteus nousi tarkasteltavassa kohdassa lähelle 100 % RH koejakson aikana tai kokeiden jatkuessa voitiin olettaa, että huokosilman kosteus tulisi todennäköisesti saavuttamaan hyvin korkean suhteellisen kosteuden ja kosteus kondensoituisi rakenteeseen.

Ennen tutkimusta kokeille asetettiin tavoiteajat. Seinä rakenteiden oli tarkoitus olla jokaisessa kolmessa koejaksoissa noin kaksi viikkoa ja siten yhden kokeen kesto olisi ollut noin 1,5 kuukautta. Kahden viikon aikana oli tavoitteena, että jokainen rakenne olisi saavuttanut sekä lämpötilan että suhteellisen kosteuden osalta ns. stationääritilan.

Lämpötilojen osalta aiempien tutkimusten avulla tiedetään, että niiden tasoittuminen on melko nopeaa, mutta erityisesti rakenteiden huokosilman suhteelliset kosteudet ja niiden tasoittuminen on riippuvainen useasta tekijästä. Joissakin tapauksissa suhteellisten kosteuksien stationääritilaan pääseminen vie useita viikkoja, jopa kuukausia aikaa. Tästä syystä joidenkin rakenteiden kohdalla siirryttiin seuraavaan koejaksoon ennen kuin stationääritila oli saavutettu suhteellisten kosteuksien osalta.

2 RAKENTEIDEN LÄMPÖTEKNISET PERUSTEET

2.1 Lämmön siirtymismuodot

Lämpö voi siirtyä paikasta toiseen (esimerkiksi rakenteiden sisällä) kolmella eri tavalla: Johtumalla, säteilemällä ja konvektion avulla. Johtumista tapahtuu sekä kiinteässä aineessa että ilmahuokosissa, mutta säteilyllä ja konvektiolla lämpöenergia siirtyy ainoastaan ilmahuokosissa (Vinha 2007b).

2.1.1 Johtuminen

Lämmön johtumisessa molekyylien liike-energiaa siirtyy molekyylistä toiseen sisäisen värähtelyn vaikutuksesta ilman, että molekyylien paikat vaihtuisivat. Lämmön siirtymisen takia sanotaankin, että lämmön johtuminen on lämmön virtausta. Lämpö pyrkii tasoittumaan väliaineessa eli virtaamaan lämpimästä kylmempään päin (Björkholz 1997).

Lämpövirran tiheys q (W/m^2) voidaan laskea jatkuvuustilassa lämpötilajakauman ollessa lineaarinen materiaalikerroksen läpi kaavalla 2.1:

$$q = \lambda \frac{(t_1 - t_2)}{d} \quad (2.1)$$

missä

λ	materiaalin lämmönjohtavuus ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)
$t_1 - t_2$	materiaalikerroksen yli vallitseva lämpötilaero (K)
d	materiaalikerroksen paksuus

Materiaalin paksuuden d ja materiaalin lämmönjohtavuuden λ suhdetta d/λ kutsutaan materiaalin lämmönvastukseksi R ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$) (kaava 2.2):

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (2.2)$$

Rakenteen koostuessa useasta homogeenisesta ainekerroksesta, voidaan lämpövirran tiheys q laskea kaavalla 2.3:

$$q = \frac{(t_1 - t_2)}{\Sigma R} \quad (2.3)$$

Kokonaislämpövirta Φ materiaalin läpi lasketaan kaavalla 2.4:

$$\Phi = q \cdot A = \lambda \cdot A \frac{t_1 - t_2}{d} \quad (2.4)$$

missä

Φ	lämpövirta (W)
A	pinta-ala (m ²)

Taulukossa 2.1 on esitetty tyypillisimpien rakennusmateriaalien lämmönjohtavuuksia λ (Björkholz 1997, Hagentoft 2001, Vinha et al. 2005). Rakennusmateriaalien lämmönjohtavuudet ovat riippuvaisia myös lämpötilasta ja kosteudesta (Vinha et al. 2005). Taulukossa 2.1 annetut arvot ovat tyypillisiä kyseisten rakennusmateriaalien lämmönjohtavuusarvoja. Eri lähteissä materiaalien lämmönjohtavuuksissa on jonkin verran eroja.

Taulukko 2.1 Eräiden tyypillisten rakennusmateriaalien lämmönjohtavuuksia λ . (Björkholz 1997, Hagentoft 2001, Nevander & Elmarsson 1994, Vinha et al. 2005).

Aine	Lämmönjohtavuus λ (W/(m·K))
Polyuretaani	0,024...0,045
Polystyreeni (XPS)	0,037... 0,050
Solupolystyreeni (EPS)	0,037...0,045
Mineraalivilla	0,031...0,055
Polyesterikuitu	0,045
Puukuitueriste	0,035...0,049
Korkki	0,045...0,055
Solulasi	0,06...0,07
Lastuvillalevy	0,075...0,10
Sahanpuru-kutterinlastu	0,049... 0,14
Kevytsora	0,10...0,13
Kevytbetoni	0,10...0,18
Kevytsorabetoni	0,20...0,28
Huokoiset – kovat puukuitulevyt	0,044...0,13
Vaneri	0,11...0,15
Kipsilevy	0,15...0,22
Lastulevy	0,15
Puu	0,14
Tiili muurattuna	0,5...1,0
Rappauslaastit	0,9...1,2
Betoni	1,0...2,0
Teräs, ruostumaton	20
Teräs	50...70
Alumiini	170...200

2.1.2 Säteily

Säteilyssä lämpöenergia siirtyy valon nopeudella kahden eri lämpötilassa olevan pinnan välillä sähkömagneettisen aaltoliikkeen avulla. Säteilyä syntyy, kun aineen atomeissa ja molekyyleissä olevien elektronien paikat muuttuvat. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella lähettävät eli emittoivat lämpöenergiaa ympäristöönsä. Säteilyn eteneminen ei vaadi väliainetta vastaavalla tavalla kuin lämpöenergian siirtyminen johtumisen tai konvektion vaikutuksesta, vaan väliaine voi päinvastoin hidastaa säteilyn etenemistä pintojen välillä. (Vinha 2007b).

Eniten säteilyä emittoi ns. musta kappale, jonka kokonaissäteily E_b (W/m²) voidaan laskea kaavalla 2.5:

$$E_b = \sigma \cdot T^4 \quad (2.5)$$

missä

σ	Stefan-Bolzmännin vakio ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)
T	Säteilyä lähettävän kappaleen pinnan lämpötila (K)

Todellisten pintojen tarkasteluissa ainoastaan auringon säteilyteho vastaa ns. mustan kappaleen emittoimaa säteilytehoa, joten todellisten pintojen säteilyteho E saadaan todellisen säteilytehon E ja ideaalisen mustan kappaleen välisen säteilytehon E_b suhteena. Tätä suhdetta E/E_b kutsutaan pinnan emissiviteetiksi ε (-). Eri materiaaleilla on erilaiset emissiviteetti-arvot. Emissiviteetin arvot vaihtelevat välillä 1-0. Suurimmalla osalla rakennusmateriaaleja pinnan emissiviteetti on huonelämpötila-alueella välillä 0,8-0,95. Selvimmän poikkeuksen tekee alumiini ja alumiiniväri (Björkholz 1997). Taulukossa 2.2 on esitetty eräiden pintojen emissiviteettejä huoneen lämmössä (Björkholz 1997, Paloniitty & Kauppinen 2006).

Kaavalla 2.6 voidaan todellisten pintojen säteilyteho E (W/m^2) laskea seuraavasti:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.6)$$

Taulukko 2.2 Esimerkkejä eri pintojen emissiviteeteistä huonelämpötila-alueella (Björkholz 1997, Paloniitty & Kauppinen 2006).

Pinta	Emissiviteetti ε
Alumiini	
- Kirkas (folio)	0,09
- oksidoitunut	0,20...0,33
Betoni, karkea	0,94...0,97
Huurre	0,985
Kattohuopa	0,92...0,94
Kipsi	0,8...0,9
Lastulevy	0,77... 0,89
Lasi	0,94
Maalit, lakat	
- alumiiniväri	0,27...0,62
- emalilakka	0,85...0,95
- musta maali	0,8...0,97
- valkoinen maali	0,9...0,97
Polystyreeni	0,60
Puu (höylätty)	0,8...0,9
Poltettu tiili	0,91
Tiili (punainen)	0,88...0,93
Rappaus	0,86...0,91
Kalkkiahiekkatiili	0,9

Todellisuudessa johonkin pintaan osuvasta säteilystä osa heijastuu, osa säteilystä absorboituu pintaan ja osa tunkeutuu materiaalin läpi. Rakennusmateriaaleista esimerkiksi lasi on sellainen, jossa säteily tunkeutuu myös materiaalin läpi. Eri säteilykomponenttien osuutta kokonaissäteilystä kuvataan seuraavilla kertoimilla:

ρ = heijastuskerroin (-)

α = absorptiokerroin (-)

τ = läpäisykerroin (-)

Edellä mainittujen kertoimien kesken on voimassa yhtälö (2.7):

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.7)$$

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa pinnat emittoivat aina pitkäaaltoista säteilyä, jolloin pinnan emissiviteetti on yleensä varsin suuri riippumatta pinnan vaaleudesta. Rakennusfysiikassa tarkastellaan yleensä materiaaleja (lasia lukuun ottamatta), joilla ei ole merkittävää läpäisykerrointa. Näin ollen pinnan heijastuskerroin voidaan laskea yleensä kaavalla 2.8.

$$\rho = 1 - \alpha \quad (2.8)$$

Taulukossa 2.3 on esitetty eräiden materiaalien heijastuskertoimia.

Taulukko 2.3 Eräiden materiaalien pintojen heijastuskertoimia (Björkholz 1997).

Pinta	Heijastuskerroin ρ
Valkoinen maali ja valkoinen rappaus	0,7
Vaaleat värit, keltainen tiili	0,5
Betoni, tummanpunainen tiili	0,3
Hiekka, sepeli, vaalea kivi	0,2
Tummat värit	0,15
Tumma kattohuopa, musta väri	0,1

2.1.3 Konvektio

Konvektiolla tarkoitetaan lämmön siirtymistä kaasun tai nesteen virtauksen mukana. Virtaus voi tapahtua ulkoisen voiman vaikutuksesta (pakotettu konvektio) tai lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen seurauksena (luonnollinen konvektio). Pakotettua konvektiota aiheuttaa sisätiloissa mm. ilmanvaihdon puhaltimet. Rakennuksen ulkopuolella pakotettua konvektiota aiheuttaa erityisesti tuuli. Puhtaasti luonnollista konvektiota rakenteissa esiintyy yleensä harvoin. Yleensä kyse on

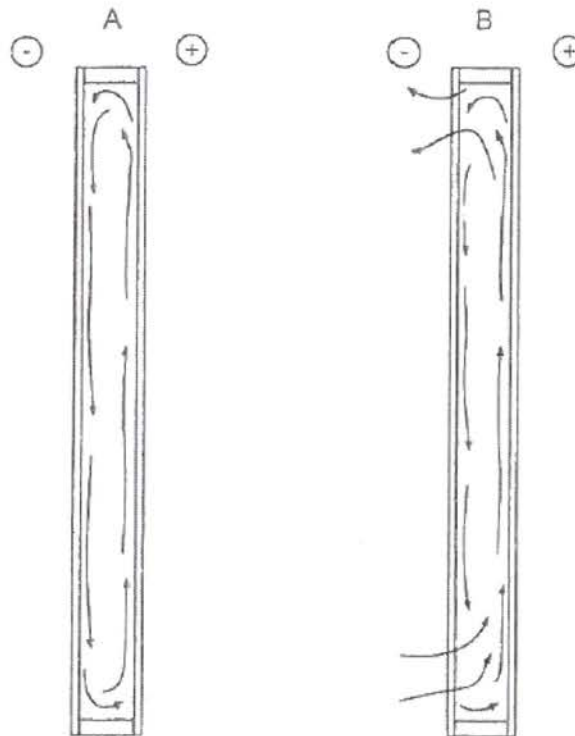
molempien yhdistelmästä. Rakennusfysiikassa tarkastellaan tyypillisesti ilman konvektiota (Björkholz 1997).

Rakennustekniikassa konvektio on merkittävä lämmönsiirtymisen muoto rakennuksen vaipan ulko- ja sisäpinnalla. Rakennuksen vaipan ulkopinnalla konvektio on lähes aina pakotettua ja ilman virtausnopeus pinnan lähellä on melko suuri. Tästä syystä konvektiolla on yleensä mm. säteilyä suurempi merkitys ulkopinnan kokonaislämmönsiirtymistä tarkasteltaessa. Sen sijaan rakennuksen vaipan sisäpinnalla konvektiolla on yleensä säteilyä pienempi merkitys sisäpinnassa tapahtuvaan kokonaislämmönsiirtymiseen, koska sisäpinnan konvektiovirtaukset ovat yleensä hyvin pieniä (Iivonen & Viljanen 1984).

Esimerkkinä ulkoseinärakenteissa tapahtuvista konvektiovirtauksista ovat mm. rakenteen läpi tapahtuva konvektio, tuulensuojan läpi tapahtuva konvektio sekä rakenteen sisäinen konvektio (ks. kuva 2.1) (Vinha 2007a).

Rakenteen läpi tapahtuvaa konvektiota aiheutuu sisä- ja ulkoilman välisestä paine-erosta yleisimmin silloin, kun sisäpinnan ilmansulku ei ole tiivis. Tuulensuojan läpi tapahtuvaa konvektiota aiheutuu tuulen vaikutuksesta, kun tuulensuoja on liian harva tai se on virheellisesti asennettu. Rakenteen sisäistä konvektiota aiheutuu rakenteen pintojen välisistä lämpötilaeroista, kun lämmöneristekerros on paksu ja siinä on yhtenäinen huokosverkosto. Tällainen huokoinen lämmöneriste on esimerkiksi mineraalivilla. Lämmöneristeessä oleva ilma lämpenee sisäpinnan läheisyydessä, jolloin sen tiheys pienenee ja se pyrkii virtaamaan ylöspäin, kun taas kylmän ulkopinnan läheisyydessä ilma jäähtyy ja virtaa alaspäin. Rakenteiden sisäisiä konvektioita lisäävät oleellisesti rakenteissa esiintyvät ns. epäideaalisuudet. Epäideaalisuuksilla ei tarkoiteta rakennusvirheitä, vaan ne kuuluvat rakenteen ominaisuuksiin. Tällaisia ovat ulkoseinärakenteessa mm. runkopuun ja lämmöneristeen välinen kontaktipinta ja lämmöneristelevyjen väliset keskinäiset kontaktipinnat (Ojanen & Kohonen 1989).

Rakenteiden sisäinen konvektio mm. heikentää rakenteen lämmöneristyskykyä. Erään tutkimuksen mukaan (Kokko et al. 1997) esimerkiksi 200 mm:n paksuisessa eristeessä tehollinen lämmöneristyspaksuus alenee noin 12 % ja 300 mm paksuisessa eristeessä noin 17 % sisäisen konvektion vaikutuksesta.



Kuva 2.1

Periaatekuva rakenteen sisäisestä konvektiosta. Tapauksessa A sisäinen konvektio aiheutuu seinän ylä- ja alaosan lämpötilaerosta. Tapauksessa B sisäinen konvektio aiheutuu lämpötilaerosta ja tuulesta (Vinha 2007a).

3 RAKENTEIDEN KOSTEUSTEKNISET PERUSTEET

3.1 Kosteuden esiintyminen

3.1.1 Ilman kosteus

Kuiva ilma koostuu useista eri kaasuista, mm. typestä ja hapestä. Kosteaa ilma sisältää lisäksi vesihöyryä. Vesihöyry on kevyempää kuin kuiva ilma, joten ilmaseos on sitä kevyempää, mitä enemmän siinä on kosteutta (Björkholz 1997).

Tiettyssä lämpötilassa ilma voi sisältää vain tietyn määrän vesihöyryä. Tämä määrä on riippuvainen lämpötilasta siten, että mitä korkeampi on lämpötila, sitä enemmän vesihöyryä samankokoiseen ilmatilavuuteen mahtuu. Korkeinta vesihöyrynmäärää, joka tietyn lämpöiseen ilmaan voi mahtua, kutsutaan kyllästyspitoisuudeksi ν_k tai kyllästyspaineeksi $p_{\nu,k}$. Liitteessä 1 on esitetty vesihöyryn kyllästyspitoisuuksia eri lämpötiloissa. Esimerkiksi +20 °C:n ilma voi sisältää vesihöyryä 17,28 g/m³, kun taas esimerkiksi -5 °C:n ilma ainoastaan 3,25 g/m³.

Rakennusfysiikassa ilman kosteusmääriä ilmaistaan yleisemmin vesihöyrypitoisuuksina (absoluuttinen kosteus) ν (g/m³), vesihöyryn osapaineina p_ν (Pa) tai suhteellisina kosteuksina ϕ (% RH). Vesihöyrypitoisuus ν (g/m³) kertoo kuinka monta grammaa kosteutta on yhdessä ilmakehän tilavuudessa. Vesihöyryn osapaineella p_ν (Pa) tarkoitetaan painetta, jonka ilman sisältämä vesihöyry aiheuttaa (ilmassa oleva vesihöyry muodostaa osan ilmakehän kokonaispaineesta). Vesihöyrypitoisuuden ja lämpötilan lisäys kasvattavat vesihöyryn osapainetta. Suhteellinen kosteus ϕ (% RH) ilmoittaa ilmassa olevan todellisen vesihöyrypitoisuuden ν suhdetta kyllästyspitoisuuteen ν_k tai todellisen vesihöyryn osapaineen p_ν suhdetta kyllästyspaineeseen $p_{\nu,k}$ kyseisessä lämpötilassa. Suhteellinen kosteus ilmaistaan prosentteina. Suhteellinen kosteus ei voi ylittää 100 % RH:a. Ilman suhteellinen kosteus ϕ lasketaan kaavalla 3.1 tai 3.2.

$$\varphi = \frac{v}{v_k} \times 100 \quad (3.1)$$

missä

v ilman kosteuspitoisuus (g/m^3)

v_k ilman kyllästyskosteuspitoisuus tietyssä lämpötilassa (g/m^3)

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{v,k}} \times 100 \quad (3.2)$$

missä

p_v ilman vesihöyrynpaine (Pa)

$p_{v,k}$ ilman kyllästyspaine tietyssä lämpötilassa (Pa)

3.1.2 Materiaalin kosteus, tasapainokosteus ja hygroskooppisuus

Kosteuden sitoutuminen materiaaliin tapahtuu pääasiassa kahdella tavalla; kemiallisesti ja fysikaalisesti. Kemiallisella sitoutumisella tarkoitetaan sitä, että vesimolekyylit ovat osa materiaalin rakennetta. Tällaisesta materiaalista hyvänä esimerkkinä on betoni. Fysikaalisella kosteuden sitoutumisella materiaaliin tarkoitetaan sitä, että materiaaliin siirtyy kosteutta materiaalin ulkopuolelta esimerkiksi erillisestä kosteuslähteestä. Yhtenä esimerkkinä materiaalin fysikaalisesta kosteuden sitoutumisesta on ilman sisältämän vesihöyryn siirtyminen materiaalin huokosilmaan tai huokosilmasta pois (Vinha 2007b).

Materiaalien kosteuspitoisuus ilmoitetaan yleisemmin paino-osina, painoprosentteina, vesimääränä tilavuutta kohden, tilavuusosina tai tilavuusprosentteina. Kosteuspitoisuus paino-osina u (kg/kg) lasketaan kaavalla 3.3 ja painoprosentteina u (paino-%) kaavalla 3.4.

$$u = \frac{m_w}{m_d} \quad (3.3)$$

$$u = \frac{m_w}{m_d} \times 100 \quad (3.4)$$

missä

m_w materiaalin sisältämän veden massa (kg)

m_d materiaalin kuivapaino (kg)

Kosteuspitoisuus vesimääränä tilavuutta kohden w (kg/m³) lasketaan kaavalla 3.5.

$$w = \frac{m_w}{V_d} \quad (3.5)$$

missä

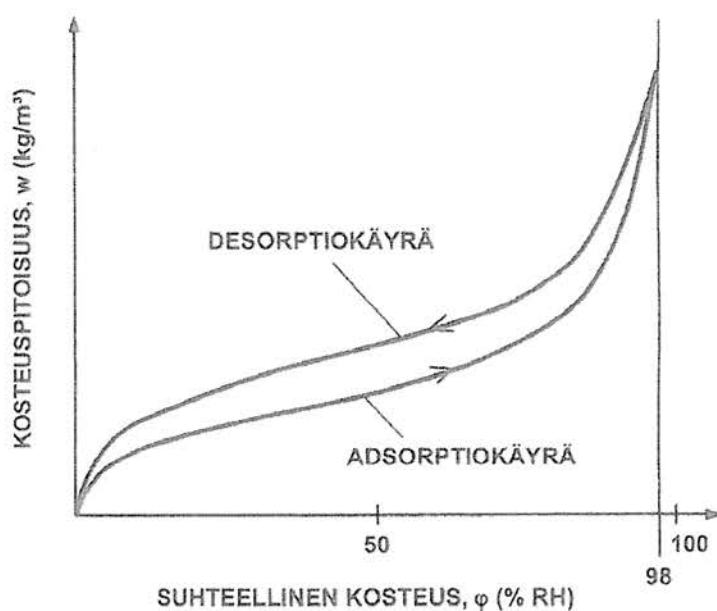
m_w materiaalin sisältämän veden massa (kg)

V_d materiaalin tilavuus kuivana (m³)

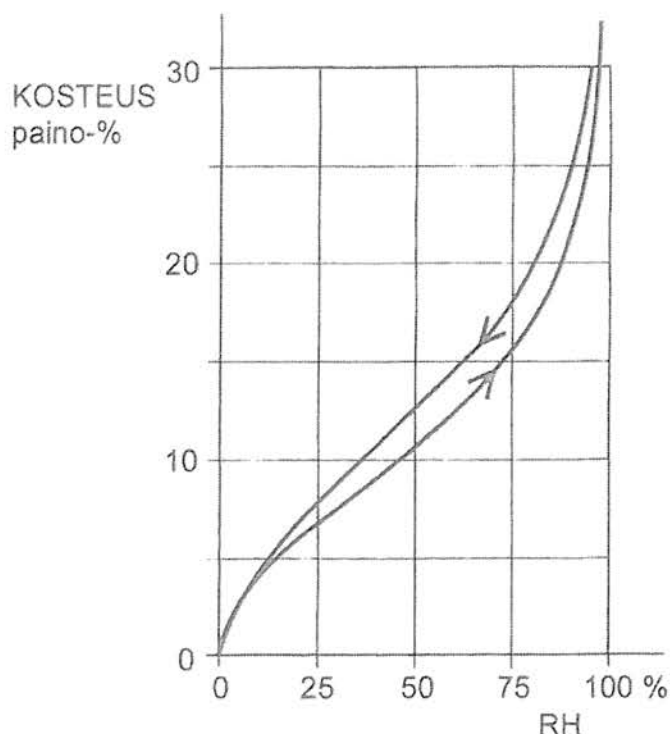
Materiaalit pyrkivät sitomaan ympäröivästä ilmasta kosteutta tai vastaavasti luovuttamaan sitä ympäröivään ilmaan siten, että ne saavuttavat ns. tasapainokosteuden. Materiaalien kykyä sitoa ilmasta ja luovuttaa ilmaan kosteutta kutsutaan hygroskooppisuudeksi. Jokaisella materiaalilla on erilainen tasapainokosteus. Materiaalin tasapainokosteus riippuu lähinnä siitä, minkälainen on ympäröivän ilman suhteellinen kosteus. Materiaalit pyrkivät aina tasoittumaan ympäröivän ilman suhteelliseen kosteuteen. Myös ympäröivän ilman lämpötila vaikuttaa tasapainokosteuteen. Materiaalin tasapainokosteus ilmaistaan usein sorptio- eli tasapainokäyränä, jossa toisena muuttujana on materiaalin sitoma kosteus ja toisena muuttujana ympäröivän ilman suhteellinen kosteus. Eri materiaaleilla tasapainokosteuden saavuttaminen ympäristöolosuhteiden nopeasti muuttuessa kestää eri pituisen ajan. Vesihöyryä hyvin läpäisevät materiaalit saavuttavat ympäristön olosuhteita vastaavan tasapainokosteuden nopeammin kuin huonosti vesihöyryä läpäisevät materiaalit. Tasoittumisaika riippuu myös materiaalin paksuudesta. (Nevander & Elmarsson 1994).

Materiaalin tasapainokosteus on erilainen riippuen siitä lähestyykö materiaalin kosteuspitoisuus tasapainokosteuden arvoa kuivemmasta vai kosteammasta suunnasta.

Tätä tasapainokosteuksien eroa kutsutaan hystereesiksi. Kuivemmasta kosteampaan suuntaan olevaa tasapainokosteuskäyrää kutsutaan adsorptiokäyräksi ja kosteammasta kuivempaan päin olevaa tasapainokosteuskäyrää kutsutaan desorptiokäyräksi. Hystereesi on näiden käyrien välinen ero. Käytännössä materiaalin tasapainokosteus on näiden käyrien välissä, koska materiaalia ympäröivät olosuhteet ja sen johdosta myös tasapainokosteus muuttuu koko ajan (Nevander & Elmarsson 1994). Kuvassa 3.1 on esitetty tasapainokosteuden hystereesi ja kuvassa 3.2 on esimerkki puun tasapainokosteuskäyrästä (Vinha 2007b).



Kuva 3.1 Tasapainokosteuden hystereesi (Vinha 2007b).



Kuva 3.2 Puun tyypillinen tasapainokosteuskäyrä (Vinha 2007b).

3.2 Kosteuden siirtyminen rakenteessa

Kosteus siirtyy huokoisissa aineissa pääasiassa vesihöyrynä ja vetenä. Rakenteissa kosteus voi siirtyä myös lumenä ja jäänä. Kosteuden siirtymistapoja on useita, mutta rakennustekniseltä kannalta katsottuna vesihöyryn tärkeimmät siirtymismuodot ovat diffuusio ja konvektio. Veden tärkeimmät siirtymismuodot ovat kapillaarivirtaus sekä ulkoisen paineen (esimerkiksi tuulenpaineen) vaikutuksesta aiheutuva virtaus. Usein kosteuden siirtyminen on useiden siirtymismuotojen summa (Björkholz 1997). Tämän tutkimuksen kannalta merkittäviä kosteuden siirtymistapoja ovat vesihöyryn diffuusio ja konvektio, joten ainoastaan niitä käsitellään seuraavassa tarkemmin.

3.2.1 Kosteuden siirtyminen diffuusiolla

Rakennustekniikassa diffuusiolla tarkoitetaan vesihöyryn siirtymistä korkeammasta vesihöyrypitoisuudesta alhaisempaan vesihöyrypitoisuuteen eli vesihöyryn pitoisuuserot Δv (kg/m³) tai osapaine-erot Δp_v (Pa) pyrkivät tasoittumaan.

Normaalissa tilanteessa rakennuksessa sisäpuolella on mm. asumistoiminnoista johtuen suurempi vesihöyrypitoisuus (vesihöyryn osapaine) kuin rakennuksen ulkopuolella. Tämän takia kosteus (vesihöyry) pyrkii siirtymään rakennuksen sisältä ulospäin.

Kosteuden siirtymisnopeutta ja suuruutta kuvataan kosteusvirran tiheydellä g ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$). Kosteusvirran tiheyteen vaikuttaa rakenteen ulko- ja sisäpuolen vesihöyrynpitoisuusero Δv (kg/m^3) ja rakenteen eri ainekerrosten (materiaalien) vesihöyrynvastukset Z_v (s/m) tai osapaine-erojen avulla tarkasteltaessa ulko- ja sisäpuolen vesihöyryn osapaine-erot Δp_v (Pa) ja rakenteen eri ainekerrosten vesihöyrynvastukset Z_p ($\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$). Kosteusvirran tiheys g ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) voidaan laskea kaavoilla 3.6 ja 3.7 seuraavasti:

$$g = \frac{v_s - v_u}{\Sigma Z_v} \quad (3.6)$$

missä

v_s = sisäilman vesihöyrypitoisuus (kg/m^3)

v_u = ulkoilman vesihöyrypitoisuus (kg/m^3)

ΣZ_v = rakenteen eri ainekerrosten yhteenlasketut vesihöyryn vastukset (s/m)

$$g = \frac{p_{v,s} - p_{v,u}}{\Sigma Z_p} \quad (3.7)$$

missä

$p_{v,s}$ = sisäilman vesihöyryn osapaine (Pa)

$p_{v,u}$ = ulkoilman vesihöyryn osapaine (Pa)

ΣZ_p = rakenteen eri ainekerrosten yhteenlasketut vesihöyryn vastukset ($\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$)

Eri ainekerrosten vesihöyrynvastukset Z_v (s/m) ja Z_p ($\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}$) lasketaan materiaalien vesihöyrynläpäisevyyksien avulla seuraavasti (kaavat 3.8 ja 3.9):

$$Z_v = \frac{d}{\delta_v} \quad (3.8)$$

$$Z_p = \frac{d}{\delta_p} \quad (3.9)$$

missä

d = homogeenisen ainekerroksen paksuus (m)

δ_v = vesihöyrynläpäisevyys (m^2/s)

δ_p = vesihöyrynläpäisevyys ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$)

Taulukossa 3.1 on esitetty muutamien materiaalien vesihöyrynläpäisevyyksiä (δ_v) eri suhteellisissa kosteuksissa (Hagentoft 2001, Nevander & Elmarsson 1997, Vinha et al. 2005b). Materiaalien vesihöyrynläpäisevyyksiin vaikuttavat mm. materiaalin tiheys, kosteuspitoisuus ja lämpötila (Vinha et al. 2005b).

Taulukko 3.1 Eräiden materiaalien vesihöyrynläpäisevyyksiä δ_v eri suhteellisen kosteuden arvoilla Hagentoft 2001, Nevander & Elmarsson 1997, Vinha et al. 2005b).

Materiaali	Vesihöyrynläpäisevyys $\delta_v \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$			
	35-70 % RH	70-80 % RH	80-90 % RH	90-95 % RH
Betoni K30	0,12...0,25	0,20...0,50	0,55...1,60	1,75...4,8
Betoni K45	0,12...0,25	0,15...0,50	0,45...0,90	1,65...2,0
Kevytbetoni 400 kg/m^3	3,5...4,3	3,5...4,3	3,8...4,3	5,8...6,4
Kevytbetoni 500 kg/m^3	2,0...2,4	2,4...3,2	3,2...4,2	4,2...4,9
EPS	1,15	1,15	1,15	1,15
XPS	0,2	0,2	0,2	0,2
Puu (tangentialinen suunta)	0,3...0,6	0,6...1,0	1,0...1,6	1,6...2,1
Kuitusementtilevy	0,30...0,33	0,33...0,43	0,43...0,57	0,57...0,66
Puukuitulevy (suuritiheysinen)	0,11...0,16	0,16...0,22	0,22...0,31	0,31...0,37
Puukuitulevy (pienitiheysinen)	4	4	4	4
Kipsilevy	3...3,6	3,6...4,7	4,7...6,3	6,3...7,2
Sementtilaasti	0,2	0,2	0,5	1

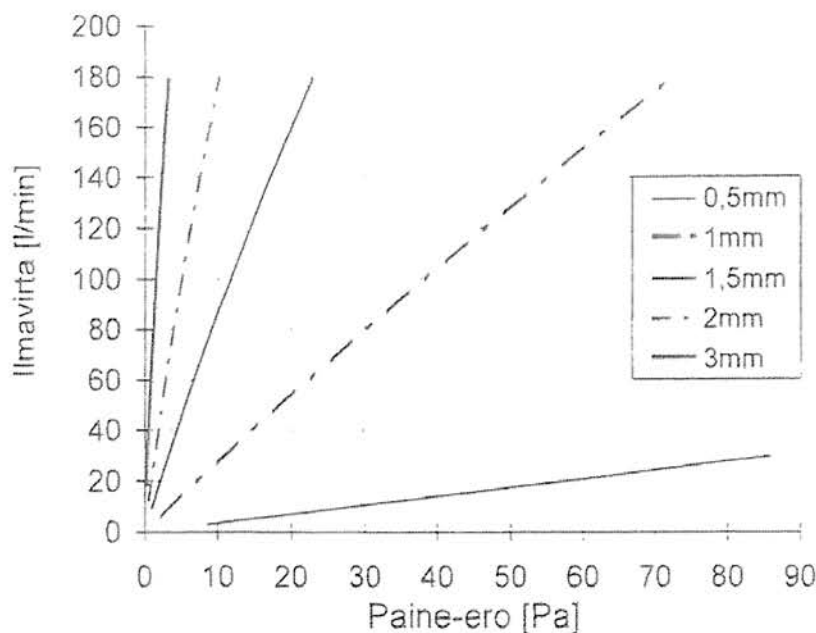
3.2.2 Kosteuden siirtyminen konvektiolla

Kosteuskonvektiolla tarkoitetaan tapahtumaa, jossa vesihöyry siirtyy ilmavirtausten mukana paikasta toiseen. Ilmavirtaukset syntyvät ilmanpaine-eroista. Ilmanpaine-eron voi aiheuttaa tuuli, ilmanvaihtolaitteet ja esimerkiksi rakenteiden yli vallitseva lämpötilaero. Vastaavalla tavalla kuin aiemmin mainittiin lämmönsiirtymisestä konvektion vaikutuksesta, vesihöyry voi kulkeutua konvektion mukana esimerkiksi ilmaa läpäisevän materiaalin läpi tai rakenteissa olevien rakojen ja reikien kautta. Potentiaalina vesihöyryn konvektiossa on siis ilmanpaine-erot (Siikanen 1996).

Rakenteiden toiminnan kannalta oleellista on, miten ilmanpaine-erot vallitsevat rakenteiden yli eli mihin suuntaan mahdollinen konvektio rakenteiden yli tapahtuu.

Ulkoilman ollessa sisäilmaa kylmempää rakennusten sisäpuolella on yleensä sellainen tilanne, että rakenteiden alaosat (esimerkiksi seinän alaosat) ovat alipaineisia ulkoilmaan nähden ja rakenteiden yläosat ovat ylipaineisia ulkoilmaan nähden. Kostean ilman virratessa sisältä ulospäin ilman lämpötila laskee ja tuloksena voi olla kosteuden tiivistymistä haitallisissa määrin rakenteisiin. Kosteuden tiivistymistä (kondensoitumista) on käsitelty tarkemmin kohdassa 3.2.3. Jos konvektio tapahtuu ulkoa sisälle päin, ilma lämpenee virratessaan sisälle. Tällöin lämpenevä ilma kuivattaa rakenteita, koska ilman kosteuden sitomiskyky kasvaa (Pentti & Hyppöläinen 1999). Toisaalta ulkoa sisälle päin virtaava ilma jäädyttää rakenteen sisäpintaa, jolloin siinä voi esiintyä enemmän homeenkasvulle otollisia olosuhteita.

Rakenteissa, joissa ilmatiiviys on huono, voivat ilmavirtausten kuljettamat kosteusmäärät olla monikymmenkertaisia diffuusiolla kulkeutuvaan vesimäärään verrattuna (Vinha et al. 2008a). Huokoisissa materiaaleissa tapahtuva vesihöyryn konvektio on kuitenkin yleensä pieni verrattuna rakojen ja reikien kautta tapahtuvaan konvektioon. Kuvassa 3.3 on esitetty esimerkkinä eri levyisten rakojen läpi virtaavan ilman määrä/jm eri ilman kokonaispaine-eroilla. Rako on 100 mm syvä, suora ja sileäpintainen (Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen kuntotutkimus 1997).



Kuva 3.3. Eri levyisten rakojen läpi virtaavan ilman määrä/jm eri ilman kokonaispaine-eroilla. Rako on 100 mm syvä, suora ja sileäpintainen (Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen kuntotutkimus 1997).

Materiaalin läpi konvektiolla siirtyvä absoluuttinen kosteusvirran tiheys $g_{\text{conv,abs}}$ ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) lasketaan kaavalla 3.10.

$$g_{\text{conv,abs}} = r_a \cdot v \quad (3.10)$$

missä

r_a = ilmavirran tiheys ($\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

v = materiaalin läpi virtaavan ilman vesihöyrypitoisuus (kg/m^3)

Kuitenkin rakennuksen vaipan yli tapahtuvassa konvektiovirtauksessa virtaavan ilman tilalle tulee korvausilmaa toista kautta. Tästä syystä materiaalin läpi konvektiolla siirtyvän kosteusvirran tiheys tulee laskea nettoarvona g_{conv} ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) kaavalla 3.11 seuraavasti:

$$g_{\text{conv}} = r_a \cdot (v_1 - v_2) \quad (3.11)$$

missä

r_a = ilmavirran tiheys ($\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

v_1 ja v_2 = vesihöyrypitoisuudet materiaalin eri puolilla (kg/m^3)

3.2.3 Kosteuden kondensoituminen

Kosteutta (vesihöyryä) voi tiivistyä eli kondensoitua rakenteiden sisälle ja rakenteiden pintoihin. Tyypillisimmin kosteuden kondensoitumisen rakenneteknisissä tarkasteluissa aiheuttaa kosteuden siirtyminen rakenteen sisällä diffuusion tai konvektion vaikutuksesta. Esimerkiksi vaipparakenteita tarkasteltaessa rakenteen yli vallitsee lämpötilaero, jolloin rakenteen huokosilman vesihöyrypitoisuus voi saavuttaa tietyssä kohtaa rakennetta vesihöyryn kyllästyskosteuden. Tällöin kosteus alkaa kondensoitua rakenteen sisään. Samojen olosuhteiden jatkuessa rakenteessa kondensoituvan kosteuden määrä myös jatkuvasti kasvaa.

Kosteuden tiivistymisessä rakenteiden sisäpinnoille vaikuttavat oleellisesti seuraavat tekijät:

- Rakenteen lämmönvastus
- Sisäpinnan lämmönvastus
- Sisäpinnan vesihöyrynvastus
- Sisäilman kosteuspitoisuus
- Ulkoilman lämpötila

Neljään ensimmäiseen tekijään voidaan vaikuttaa rakenneteknisillä ratkaisuilla (Björkholz 1997).

Vaipparakenteiden sisällä kosteuspitoisuudet vaihtelevat jatkuvasti. Tämä johtuu ympäröivien olosuhteiden suurista vaihteluista (vuodenajat, sateet, auringonpaiste jne.). Rakenteet ja rakenteita ympäröivät olosuhteet eivät saa olla sellaisia, että rakenteen kosteuspitoisuus ajan kuluessa kasvaa. Seinä rakenteita suunniteltaessa on otettava huomioon ulkoa tulevan kosteuden lisäksi myös sisältä päin diffuusiolla tuleva kosteus (Björkholz 1997).

Konvektion avulla kosteuden siirto tapahtuu ensisijaisesti raoissa ja rei'issä. Kondenssia voi tapahtua käytännössä normaaleissa rakenteissa sisältä ulospäin tapahtuvan konvektiovirtauksen seurauksena (Björkholz 1997). Konvektion aiheuttamaa kosteuden kondensoitumista tapahtuu yleisemmin seinä rakenteiden yläosissa, jos kosteuden tiivistymiskohdan lämpötila on alhaisempi kuin ohivirtaavan ilman kastelämpötila. Myös huokoisissa lämmöneristeissä tapahtuva sisäinen konvektio lisää kosteuden kondensoitumisriskiä ulkoseinä rakenteen yläosassa (Ojanen & Kohonen 1989).

4 ULKORAKENTEEN RAKENNUSFYSIKAALISEEN TOIMINTAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Ulkoseinärakenteen rakennusfysikaaliseen toimivuuteen vaikuttavat useat erilaiset tekijät. Esimerkiksi ulkoseinärakenteiden kantavuustekijät sekä palotekniset vaatimukset asettavat omat reunaehdot ulkoseinärakenteiden rakennusfysikaaliselle suunnittelulle. Sen lisäksi rakennusfysikaalisesti rakenteille (tässä tapauksessa ulkoseinärakenteille) asetetaan monia vaatimuksia. Rakenteen tulee olla riittävän lämmöneristävä, kosteutta ei saa olla liikaa rakenteissa eikä sitä saa päästä rakenteisiin haitallisissa määrin sisä- eikä ulkopuolelta. Lisäksi rakenteiden tulee olla sellaisia, että ne eivät heikennä sisäilman laatua (niistä ei haihdu ilmaan haitallisissa määrin epäpuhtauksia) ja niiden tulee olla myös riittävän ilmanpitäviä. Lisäksi rakenteiden tulee myös täyttää olemassa olevat ääneneristysvaatimukset. Edellä mainituista tekijöistä johtuen suunniteltava rakenne on rakennusfysikaalisesti tarkasteltuna usein kompromissi, jossa eri ominaisuuksia ja vaatimuksia on vaikea saada optimaalisiksi. Esimerkiksi rakenteen suunnittelemisen enemmän lämpöä eristäväksi saattaa heikentää vastaavasti rakenteen kosteusteknistä toimivuutta, joka on todettu mm. lähteessä Vinha et al. (2008b).

4.1 Sisä- ja ulkoilman olosuhteet

Rakenteiden rakennusfysikaalisen toiminnan kannalta tarkasteltuna Suomen ilmasto-olosuhteet ovat vaativat verrattuna esimerkiksi Keski-Euroopan ilmastoon. Rakennusfysikaaliseen toimintaan merkittävimmin vaikuttavia tekijöitä ulkoilman olosuhteista ovat ulkoilman lämpötila, ilman kosteus, auringon säteily, tuuli ja sade. Tämän tutkimuksen kannalta merkittävämmät tekijät ulkoseinärakenteiden toimivuudelle ovat lämpötila ja ilman kosteus, joita seuraavassa käsitellään tarkemmin.

Suomen ilmasto-olosuhteissa ulkoilman lämpötila ja ilman kosteus vaihtelevat siirryttäessä etelästä pohjoiseen tai lännestä itään. Vaihtelut johtuvat monesta eri tekijästä. Maantieteellisen sijainnin lisäksi ulkoilman lämpötilat ja ilman kosteudet vaihtelevat vuoden- ja vuorokaudenaikojen mukaan. Myös esimerkiksi sääilmiöt sinällään vaikuttavat lämpötiloihin sekä ilman kosteussisältöön.

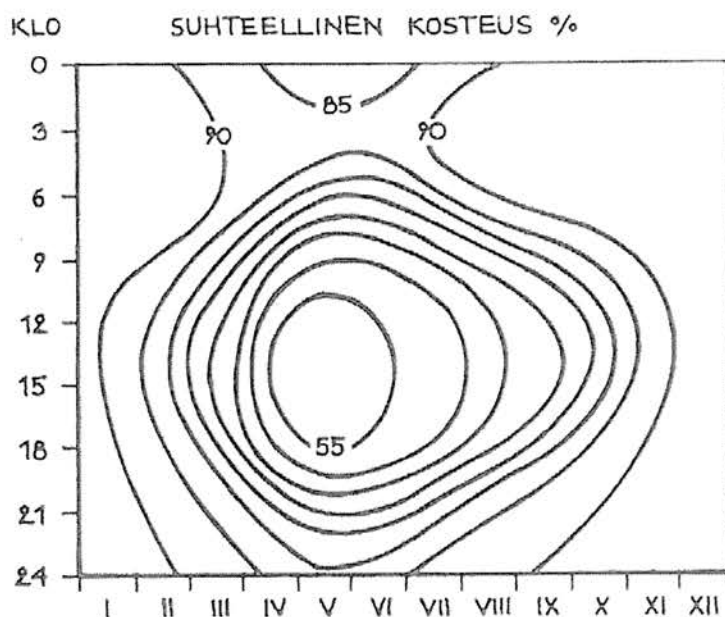
Kuvassa 4.1 on esitetty ulkoilman keskimääräiset vesihöyrypitoisuudet v (g/m^3) vuosina 1961-1990 Suomessa eri paikkakunnilla (Vinha 2007b). Kuvassa on alleviivattu

esimerkin omaisesti Tampereen kohdalta tammi- ja helmikuun arvot sekä vertailuksi keskimääräiset heinä- ja elokuun ulkoilman vesihöyrypitoisuudet. Niistä nähdään, että keskitalvella ulkoilman vesihöyrypitoisuus on keskimäärin jopa 7 g/m^3 alaisempi kuin keskikesällä.

Paikka- kunta	Kuukausi											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XIII
Hki-Vantaa	2,45	2,41	3,16	4,37	6,08	8,42	10,17	10,01	7,90	6,01	4,34	3,11
Turku	2,66	2,55	3,24	4,46	6,13	8,16	9,98	9,87	7,96	6,12	4,49	3,28
Tampere	2,18	2,14	2,84	4,05	5,65	7,76	9,58	9,46	7,47	5,57	4,11	2,76
Lranta	1,98	2,06	3,18	4,15	5,94	8,24	9,95	9,89	7,85	5,61	4,01	2,65
Joensuu	1,63	1,72	2,57	3,72	5,40	7,94	9,77	9,41	7,22	5,19	3,52	2,22
Jyväskylä	1,88	1,94	2,70	3,87	5,63	7,90	9,64	9,42	7,17	5,32	3,71	2,41
Vaasa	2,27	2,24	2,98	4,20	5,82	7,94	9,77	9,48	7,51	5,76	4,07	2,78
Oulu	1,68	1,76	2,49	3,71	5,37	7,61	9,54	9,12	6,96	5,06	3,33	2,19
Sodankylä	1,17	1,32	1,94	2,96	4,49	6,76	8,38	7,82	6,28	4,02	2,37	1,41

Kuva 4.1 Ulkoilman keskimääräiset vesihöyrypitoisuudet $v \text{ (g/m}^3\text{)}$ vuosina 1961-1990 Suomessa eri paikkakunnilla (Vinha 2007b).

Kuvassa 4.2 on esitetty periaatekuva ulkoilman suhteellisen kosteuden vuorokautisesta ja vuotuisesta vaihtelusta (Siikanen 1996).



Kuva 4.2 Periaatekuva ulkoilman suhteellisen kosteuden vuorokautisesta ja vuotuisesta vaihtelusta (Siikanen 1996). Vaaka-akselilla on kuukaudet ja pystyakselilla kellonajat.

Sisäilman lämpötilan voidaan olettaa olevan asuinrakennuksissa melko vakio, koska Suomen olosuhteissa lämmitystä tarvitaan suuren osan vuotta. Asumisterveysohjeen (2003) mukaan sisäilman hyvän tason saavuttamiseksi lämpötilan osalta huoneilman lämpötilan tulisi olla 20-21°C. Näitä arvoja sisäilman lämpötilalle voidaan pitää hyvinä lähtöarvoina tutkittaessa rakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa.

Sisäilman kosteus riippuu ulkoilman kosteudesta, tarkasteltavan tilan ilmanvaihdosta ja rakenteellisista ja toiminnallisista kosteuslähteistä. Tavallisimpia sisäilman kosteuspitoisuutta nostavia tekijöitä sisätiloissa ovat ihmisen toiminnan aiheuttama kosteustuotto, joka syntyy esimerkiksi ruoanlaitosta tai pesutoiminnoista. Uusissa rakennuksissa ja rakenteissa oleva rakennusaikainen kosteus nostaa myös sisäilman kosteuspitoisuutta (Siikanen 1996). Rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta merkittävä tekijä on sisä- ja ulkoilman vesihöyrypitoisuuksien erolla. Kyseistä pitoisuuseroa kutsutaan sisäilman kosteuslisäksi, jota on tarkasteltu tarkemmin kohdassa 4.2.

4.2 Sisäilman kosteuslisä

Sisäilman kosteuslisällä tarkoitetaan sisä- ja ulkoilman vesihöyrypitoisuuksien eroa. Sisäilman kosteuslisä vaihtelee vuodenaikojen mukaan ollen pienimmillään kesällä ja suurimmillaan talvella. Suomen ilmastossa sisäilman vesihöyrypitoisuus on lähes aina suurempi kuin ulkona, mutta kesäolosuhteissa tilanne voi olla ajoittain myös päinvastoin. Sisäilman kosteuslisää käytetään mitoittavana tekijänä vaipparakenteiden rakennusfysikaalisessa suunnittelussa (Vinha 2005a).

Kosteuslisän suuruuden voi määrittää mittaamalla tai laskennallisesti oletetun kosteustuoton avulla. Laskennallisesti sisäilman kosteuslisän Δv (kg/m³) voi laskea kaavalla 4.1.

$$\Delta v = \frac{G}{n \cdot V} \quad (4.1)$$

missä

G = kosteustuotto sisäilmaan (kg/h)

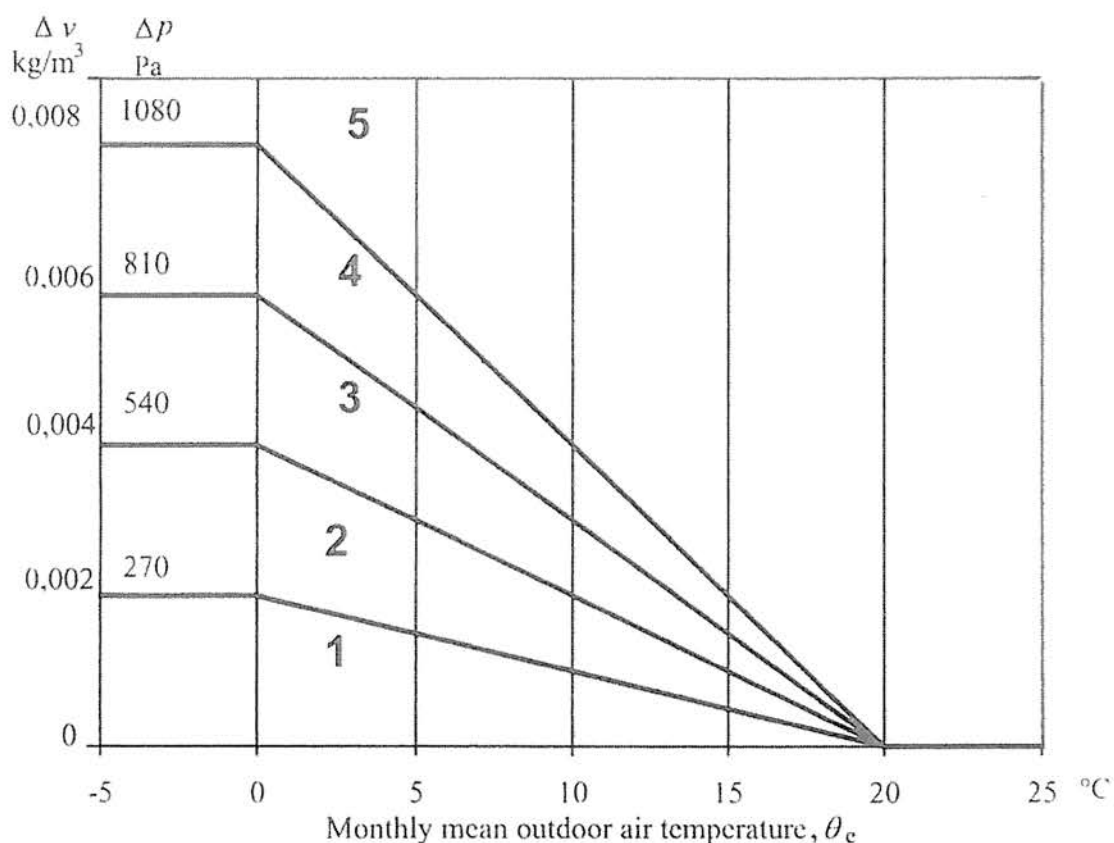
n = ilmanvaihtokerroin (1/h)

V = rakennuksen sisätilavuus (m³)

Sisäilman kosteuslisälle on annettu EN ISO 13788 -standardissa mitoituskäyrästä. Siinä kosteuslisän arvot on jaettu viiteen eri kosteusluokkaan seuraavasti:

1. Varastot ja hallit
2. Toimistot ja kaupat
3. Pientalot, joissa on vähän asukkaita
4. Pientalot, joissa on paljon asukkaita, liikuntahallit, keittiöt ja ravintolat
5. Erikoisrakennukset, esim. pesulat, panimot ja uimahallit

Kuvassa 4.3 on esitetty EN ISO 13788 -standardin mitoitusluokitukseen perustuva mitoituskäyrästä.



Kuva 4.3 EN ISO 13788 -standardin mukainen sisäilman kosteuslisän mitoituskäyrä ulkoilman lämpötilan funktiona.

Kuvassa 4.3 olevassa käyrästä sisäilman kosteuslisä riippuu ulkolämpötilasta, vaikka näiden tekijöiden välillä ei ole fyysikaalista yhteyttä. Esimerkiksi kesäisin kosteuslisän

pieneneminen johtunee ikkuna- ja ovituuletuksen lisääntymisestä sekä kosteuden tuoton vähentymisestä sisällä ja oleskelun lisääntymisestä ulkona.

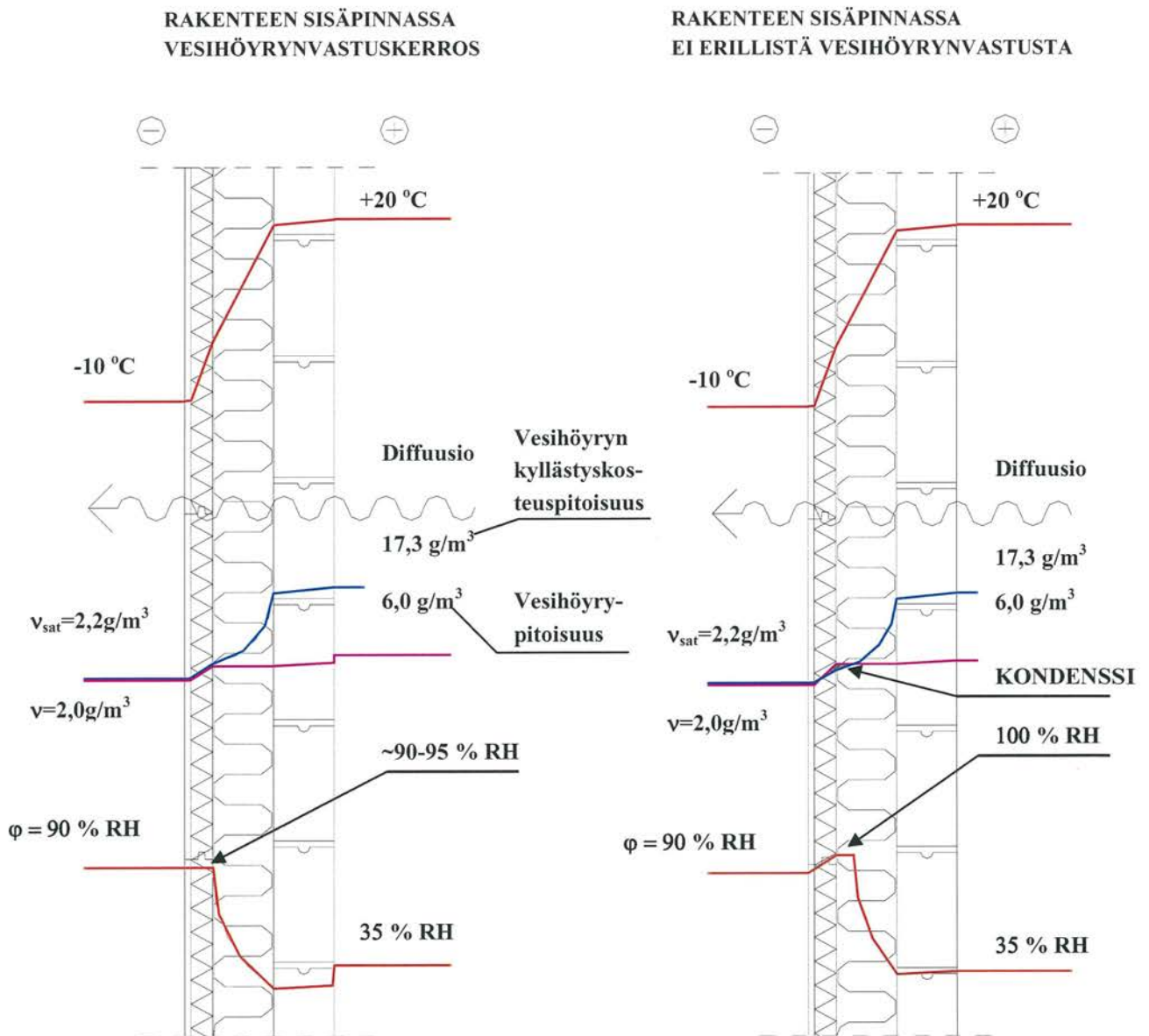
Sadasta Suomalaisesta pientalosta mittaamalla saatujen tulosten perusteella kosteuslisän mitoitusarvoksi suositellaan pientaloille $4,0 \text{ g/m}^3$ talviolosuhteissa, kun ulkolämpötila on $\leq +5 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $1,5 \text{ g/m}^3$, kun ulkolämpötila on $\geq +15 \text{ }^\circ\text{C}$. Jos asumistiheys on suuri ja / tai rakennuksessa käytetään lisäkostutusta, suositeltava kosteuslisän mitoitusarvo on talvella $5,0 \text{ g/m}^3$ ja kesällä $2,0 \text{ g/m}^3$ (Vinha et al. 2005a). Virossa tehdyn tutkimuksen mukaan edellä mainitut sisäilman kosteuslisäarvot kuvaavat melko hyvin myös Virossa olevaa tilannetta erityisesti omakotitaloissa. Kerrostaloasunnoissa sisäilman kosteuslisän mitoitusarvona voisi käyttää talvella $6,0 \text{ g/m}^3$ ja kesällä $2,5 \text{ g/m}^3$ (Kalamees 2006).

4.3 Seinän vesihöyrynvastus

Vesihöyrynvastuksella tarkoitetaan rakenteessa olevan ainekerroksen ominaisuutta, joka estää tai oleellisesti pienentää diffuusion vaikutuksesta siirtyvän vesihöyryn kulkeutumista rakenteen läpi. Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C2 (1998) määritetään, että ulkoseinärakenteen vesihöyrynvastus tulee olla sellainen, ettei seinän kosteuspitoisuus sisäilman vesihöyryn diffuusion vuoksi muodostu haitalliseksi.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C2 (1998) on annettu ohje, että höyrynsulun vesihöyrynvastuksen tulee olla vähintään viisinkertainen tuulensuojan vesihöyrynvastukseen verrattuna. Tutkimuksen (Vinha 2007a) mukaan useissa tapauksissa erityisesti puurunkoisissa ulkoseinärakenteissa tämä vastussuhde ei kuitenkaan ole riittävän suuri.

Kuvassa 4.4 on esitetty periaatekuva kahden ulkoseinärakenteen kosteusteknisestä toiminnasta Suomen talviolosuhteissa. Kuvassa on esitetty yksi tässä tutkimuksessa tarkastelluista koeseinistä, jonka ulkoeristyskerroksena on käytetty Raketerm-elementtiä. Kuvan vasemman puoleisessa seinässä on rakenne, jonka sisäpinnassa on erillinen rakenteeseen vesihöyrynvastusta antava kerros ja oikean puoleisessa seinässä rakenne, jossa ei ole erillistä vesihöyrynvastusta rakenteen sisäpinnassa. Kuvasta 4.4 nähdään, että riittävän vesihöyrynvastuksen puuttuessa rakenteen sisäpinnasta, Raketerm-elementin sisäpintaan kondensoituu haitallisessa määrin kosteutta ja rakenteessa voi esiintyä homeen kasvulle suotuisia olosuhteita liian pitkään.



Kuva 4.4

Periaatekuva kahden erilaisen Raketerm-elementillä verhoillun ulkoseinärakenteen kosteusteknisestä toiminnasta Suomen talviolosuhteissa. Kuvan vasemmanpuoleisen seinärakenteen sisäpinnassa on erillinen vesihöyrynvastuskerros ja oikean puoleinen rakenne on ilman erillistä sisäpinnan vesihöyrynvastuskerrosta. Oikeanpuoleisesta kuvasta nähdään, että Raketerm-elementin sisäpintaan alkaa kondensoitua kosteutta.

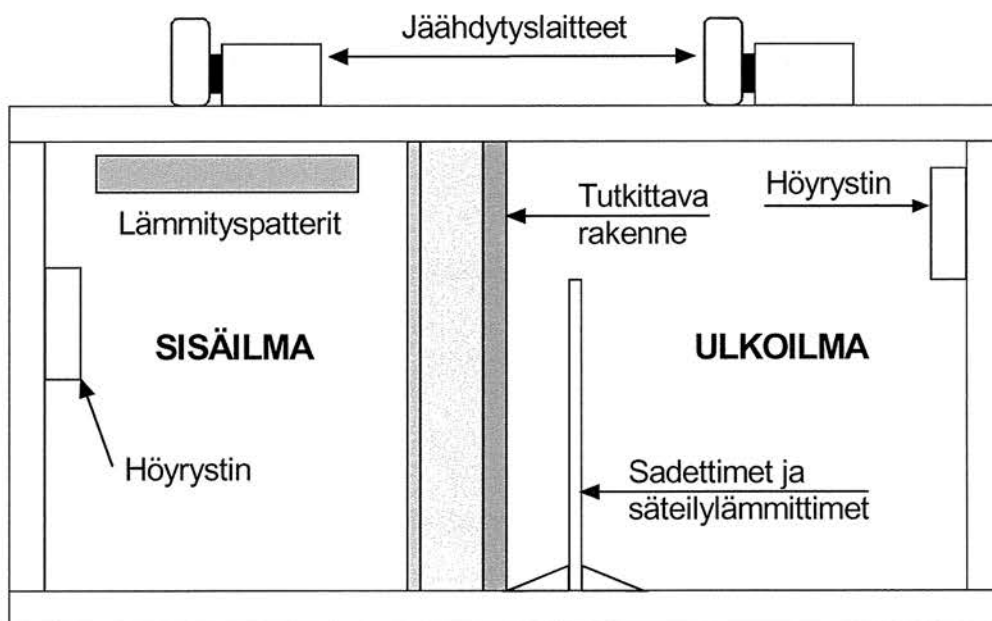
5 SEINÄRAKENTEIDEN RAKENNUSFYSIKAALISET KOKEET

5.1 Koelaitteisto

Kokeissa käytetyt koeolosuhteet saatiin aikaiseksi säärasituslaitteistolla, josta on kerrottu tarkemmin kohdassa 5.1.1. Mittaukset tehtiin erillisellä siirrettävällä kenttämittauslaitteistolla, joka sijaitsi säärasituslaitteiston ulkopuolella. Kenttämittauslaitteistosta on kerrottu tarkemmin kohdassa 5.1.2.

5.1.1 Säärasituslaitteisto

Koelaitteistona käytettiin TTY:n Rakennustekniikan laitoksen rakennushallissa olevaa ulkoseinäarakenteiden säärasituslaitteistoa. Laitteiston rakenne on esitetty kuvassa 5.1 ja kuvassa 5.2 on laitteisto kuvattuna ulkoapäin.



Kuva 5.1

Periaatteellinen kuva säärasituslaitteiston rakenteesta.



Kuva 5.2 Säärasituslaitteisto kuvattuna ulkoapäin. Kuvan vasemmassa reunassa on näkyvissä erillisessä kaapissa oleva kenttämittauslaite, jolla kokeen mittaukset suoritettiin.

Säärasituslaitteistolla voidaan tutkia yhden tai useamman samanaikaisesti vaikuttavan rasisustekijän yhteisvaikutusta rakenteeseen. Kokeet voivat olla pitkä- tai lyhytaikaisia kiihdytettyjä rasisuskokeita, joissa ilmastorasitus on säädetty ennalta laaditun säätöohjelman mukaan.

Laitteisto koostuu kahdesta koekammioista, joista toisessa mallinnetaan rakennuksen sisäilmastoa ja toisessa vastaavasti ulkona olevia sääolosuhteita. Tutkittavan seinän maksimikoko on $1980 \times 2980 \text{ mm}^2$, suurin paksuus on noin 450 mm ja paino 4000 kg. Tutkittava seinärakenne asennetaan sisä- ja ulkokammioiden väliin.

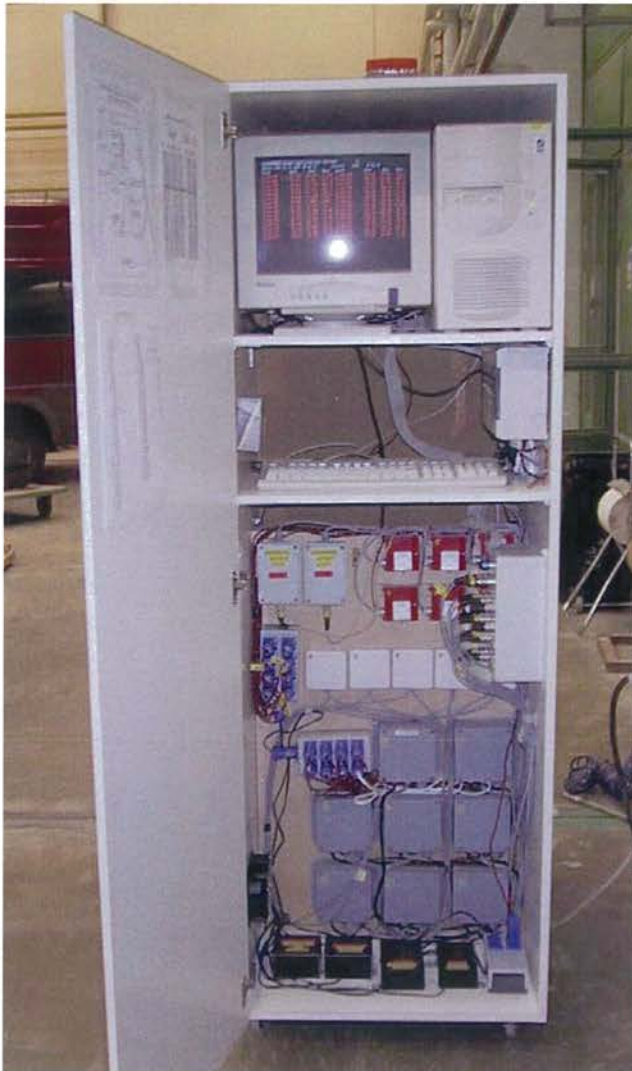
Ulkoilman lämpötilaa voidaan säätää alueella $-30 \dots +50 \text{ }^\circ\text{C}$ ja ulkoilman kosteussäätö toimii $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ korkeammissa lämpötiloissa. Ilman suhteellinen kosteus voidaan valita väliltä 40...90 % RH. Sadetuksen voimakkuutta ja sadetusveden lämpötilaa voidaan säätää. Tässä tutkimuksessa ei käytetty sadetusta. Säteilylämmittimien päälläoloaikaa säädetään yleensä pintalämpötilan mukaan (tulipalovaaran eliminoimiseksi). Syklisessä ohjelmassa asetusarvot voidaan vaihtaa minuutin välein.

Sisäilman olosuhteet säädetään yleensä tiettyyn vakioarvoon. Lämpötila voidaan valita väliltä $-20 \dots +30 \text{ }^\circ\text{C}$ ja ilman suhteellinen kosteus $+15 \text{ }^\circ\text{C}$ korkeammissa lämpötiloissa 30...80 % RH väliltä.

Laitteiston säätöautomaatiikka vakioi ilmasto-olosuhteet asetusarvojen mukaisiksi ja koetta voidaan valitulla ohjelmistolla jatkaa useiden viikkojen ajan. Syklinen ohjaus toimii tietokoneen ohjaamana, joka samalla mittaa ja tallentaa RH- ja lämpötilamuutokset.

5.1.2 Mittauslaitteistot

Kokeissa käytettiin mittauslaitteistona TTY:n talonrakennustekniikan laboratoriossa olevaa ns. kenttämittauslaitteistoa (kuva 5.3).



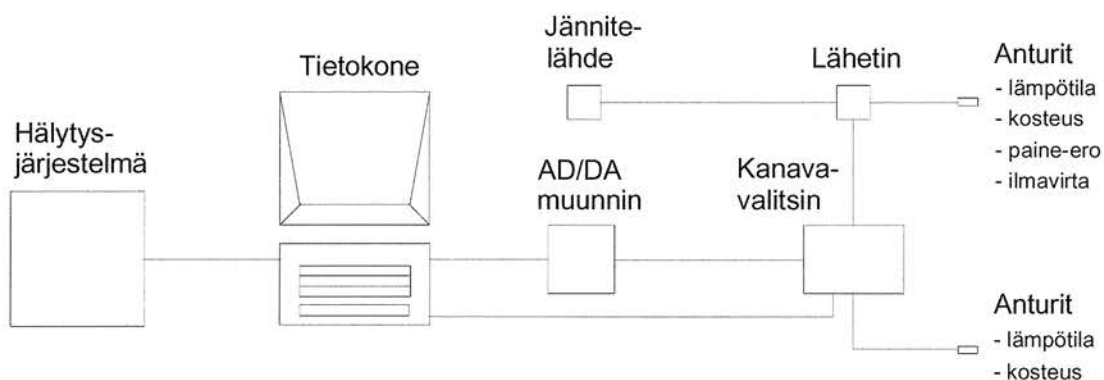
Kuva 5.3

Kuva kenttämittauslaitteistosta, joka on kokonaisuudessaan pyörillä liikkuvan kaapin sisällä. Tietokone on yläosassa ja mittauslaitteet on asennettu kaapin alaosaan.

Kenttämittauslaitteiston yleinen toimintaperiaate (Vinha et al. 2003)

Ennen kokeen alkua laitteiston ohjausohjelman syötetiedostoihin annetaan tiedot mm. kokeessa käytettävistä mittausjärjestelyistä ja –kanavista, mitattavista suureista, anturien kalibrointikertoimista sekä mittauksen aikana seurattavista mittausarvoista.

Seurannan aikana tietokone käy säännöllisesti läpi saman mittausprosessin. Mittausprosessin aikana mitataan jännitearvot kaikilta mittauskanavilta halutuin välein. Tämän jälkeen saadut jännitearvot muutetaan niitä vastaaviksi laskentasuureiksi (lämpötila, suhteellinen kosteus, paine-ero, ilmavirran nopeus jne.) muunnoskaavojen avulla ja lasketaan eri suureiden keskiarvot. Mittauksen kuluessa mitatut ja lasketut arvot tallennetaan tulostiedostoihin. Mittauksen edistymistä voidaan tarkkailla kokeen aikana numeeristen ja graafisten seurantasivujen avulla tietokoneen näytöltä. Kenttämittauslaitteiston toimintaperiaate on esitetty kuvassa 5.4.



Kuva 5.4 Kenttämittauslaitteiston toimintaperiaate (Vinha et al. 2003).

Laitteiston osat

Kokeessa oli käytössä seuraavat mittauslaitteet:

- lämpötila-anturit
- kosteuslähettimet
- ilmavirtauslähettimet
- jännitteen mittauslaitteet
- lämpövirtalevyt

Suureiden mittaaminen (Vinha et al. 2003)

Eri suureiden mittaaminen perustuu elektronisiin antureihin, joihin syötetään tietty syöttöjännite jännitelähteestä. Syöttöjännitteen avulla anturi synnyttää mitattavaan suureeseen verrannollisen jännitteen. Tämä anturilta mitattava ulostulojännite (U_i) voidaan muuttaa takaisin mitattavaksi suureeksi seuraavan muunnoskaavan avulla:

$$u_i = k \cdot U_i + b,$$

missä u_i on yksittäisen mitattavan suureen arvo. Kertoimet k ja b riippuvat anturin tai lähettimen mittausalueesta ja käytettävästä ulostulojännitteen alueesta. Anturien kertoimet määritetään joko TTY:llä tehtävissä kalibrointikokeissa tai mittaasanturien kertoimet annetaan vakioina valmistajan tekemän kalibroinnin perusteella.

Anturit ja lähettimet kytketään erilliseen mittauskanavan valintayksikköön ja siitä edelleen AD/DA –muuntimeen. Tietokoneen sisälle asennettu AD/DA –muunninkortti muuttaa saadut analogiset jännitearvot digitaaliseen muotoon, jolloin niitä voidaan käsitellä tietokoneohjelman avulla.

Mittauslaitteistossa lämpötilan mittaamiseen käytetään pääsääntöisesti puolijohdeantureita, joiden synnyttämä ulostulojännite muuttuu lämpötilan muuttuessa. Puolijohdeanturit ovat National Semiconductor Corporationin valmistamia LM 335 tyyppin antureita. Yksi lämpötila-anturi koostuu puolijohdeanturista, anturin suojuksesta ja liittimellä varustetusta mittaushodosta. Lämpötila-anturit on valmistettu TTY:llä. Laitteistossa käytettiin eri tavoin suojattuja antureita riippuen siitä, mistä paikasta lämpötiloja mitattiin.

Ilman suhteellista kosteutta mitataan Vaisala Oy:n valmistamilla HMP 233 tyyppin kosteuslähettimillä. Kosteuslähetin koostuu anturiosasta, joka on liitetty johdolla elektroniikkayksikköön. Lähettimen mittaasanturina toimii kapasitiivinen kosteusanturi. Kapasitiivisessa kosteusanturissa mitataan väliaineen dielektrisiä muutoksia kosteuden funktiona. Kosteusanturin lisäksi samassa anturiosassa on myös PT 100 tyyppin lämpötila-anturi. Kosteusanturin halkaisija on noin 13 mm.

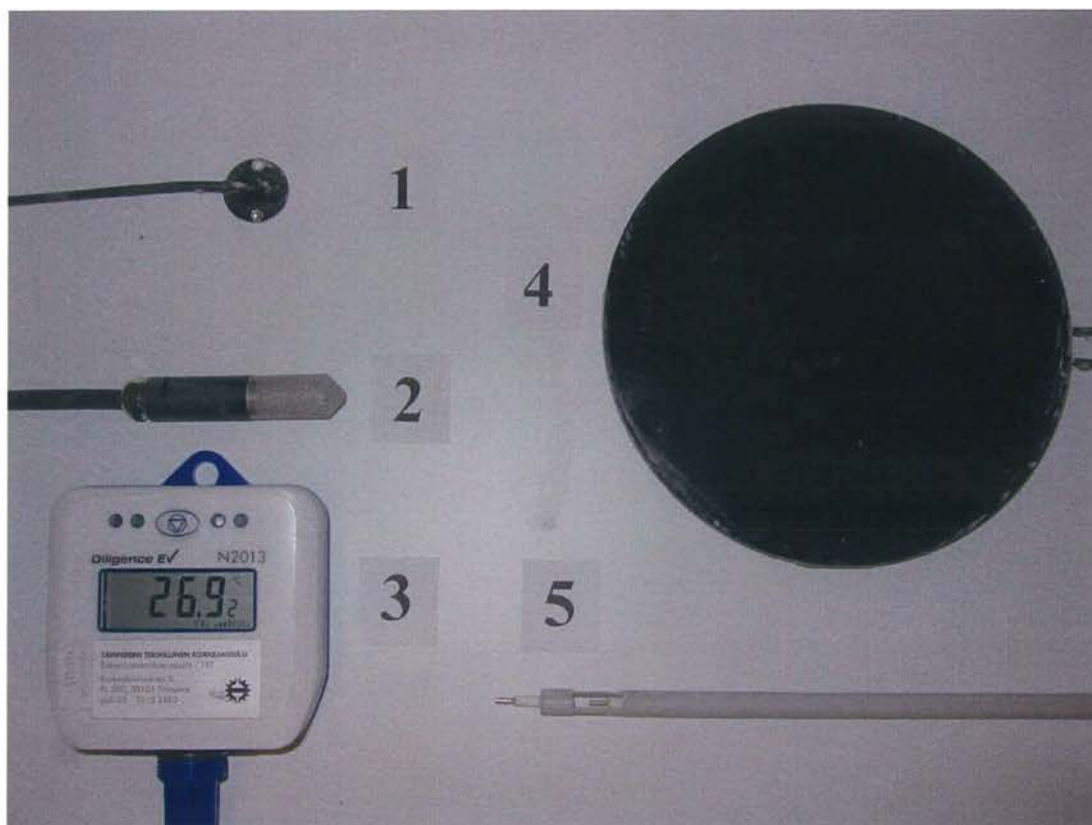
Suhteellista kosteutta mitattiin myös TTY:llä valmistetuilla kosteusantureilla. Mittaavaksi komponentiksi on valittu RHU-217-AT, jossa ei tarvita anturin ulkopuolista elektroniikkaa. Kosteusanturin lisäksi samassa anturiosassa on myös LM 335 tyyppin puolijohdelämpötila-anturi.

Sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaamisessa käytettiin lisäksi dataloggeria Comark Diligence EV.

Ilmavirtauksen nopeutta tuuletusraoissa ja -urissa mitattiin Envic Oy:n valmistamilla AFT-1D tyyppin ilmanvirtauslähettimillä. Ilmanvirtauslähetin koostuu noin 300 mm pitkstä ja halkaisijaltaan 8 mm paksuisesta anturiosasta, joka on liitetty johdolla elektroniikkayksikköön. Lähettimien mittausantureina toimii kuumalanka-anemometri. Kuumalanka-anemometri on anturiosan päässä ja sen pituus on noin 20 mm. Kuumalanka-anemometrillä mitataan virtausnopeutta seuraamalla lämmönsiirron muutoksia sähkövirralla lämmitetyssä anturissa. Anturit mittaavat suurimman ilmavirran nopeuden arvon virtauksen tulosuunnasta riippumatta. Anturit ovat pienikokoisia ja niillä on suuri taajuusvaste, joka mahdollistaa myös turbulenttisen virtauksen mittaamisen.

Koerakenteiden läpi siirtyvää lämpövirtaa mitattiin TNO TPD:n valmistamilla PU 54 tyyppin lämpövirtalevyillä. Lämpövirtalevyt ovat pyöreitä, halkaisijaltaan noin 145 mm ja paksuudeltaan noin 3 mm. Lämpövirtalevyn sisällä on termoelementtiketju, johon syntyy termojännite. Termojännite on verrannollinen lämpövirran arvoon.

Kuvassa 5.5 on esitetty mittauksessa käytettyjä antureita, lämpövirtalevy ja erillinen dataloggeri.



Kuva 5.5 Tutkimuksessa käytettyjä mittausantureita/ -laitteita. Kuvassa olevan numeroinnin mukaan anturit ovat: 1. Pintalämpötila-anturi (TTY:n valmistama) 2. Lämpötila-/ RH-anturi (Vaisala Oyj:n valmistama) 3. Dataloggeri (Comark Diligence EV) 4. Lämpövirtalevy (PU 54) 5. Ilmavirtausanturi (AFT 1D).

Ohjausohjelma (Vinha & Käkelä 1999)

Mittausta ohjataan CLIMATE –nimisellä ohjelmalla lukuun ottamatta lämpövirtalevyjen mittausta. Ohjelma koostuu syötetiedostoista, varsinaisesta mittausohjelmasta sekä tulostiedostoista. Ohjelma on tehty Quick Basic –ohjelmointikielen versiolla 4.5. Käyttöjärjestelmänä toimii DOS 6.22.

Ennen mittauksen alkua laitteiston ohjausohjelman syötetiedostoihin annetaan tiedot mm. kokeessa käytettävistä mittausjärjestelyistä, kanavista, mitattavista suureista, mittausanturien kalibrointikertoimista, tutkittavan rakenteen ominaisuuksista sekä mittauksen aikana seurattavista mittausarvoista.

Tulostiedostot muokataan Excel–taulukkolaskentaohjelmaan sopiviksi erillisen purkuohjelman avulla. Purkuohjelman avulla tulostiedostot voidaan myös jakaa halutun suuruisiin osiin ja tiivistää lyhyemmiksi.

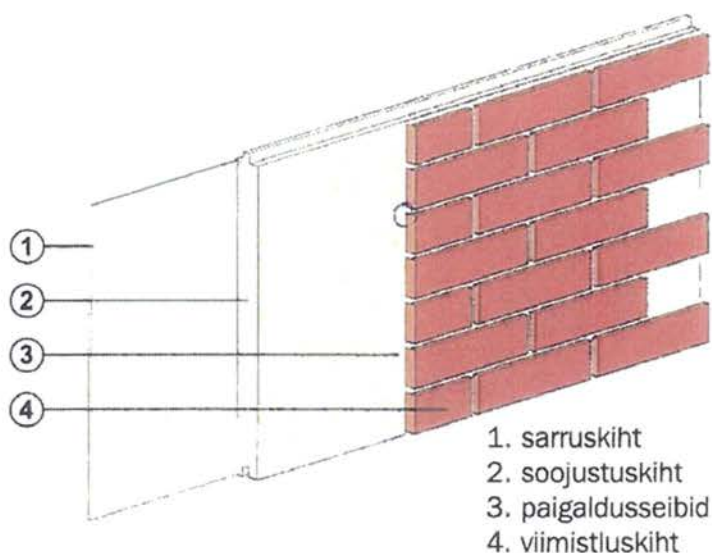
Ohjausohjelmaan on tehty erilaisia varmistuksia ja rajoituksia. Suurin riski mittauksen toiminnan kannalta on eri syistä aiheutuvat sähkökatkot. Niiden vaikutusta on pyritty eliminoimaan rakentamalla ohjausohjelmaan automaattinen nousu- ja hälytysjärjestelmä, joka käynnistää tietokoneen uudelleen sähkökatkon jälkeen ja kytkee mittausjärjestelmät uudelleen käyntiin.

Lämpövirtalevyjen mittaus tehtiin Agilent Benchlink Datalogger -ohjelmalla. Ohjelma toimii Windows-käyttöjärjestelmässä.

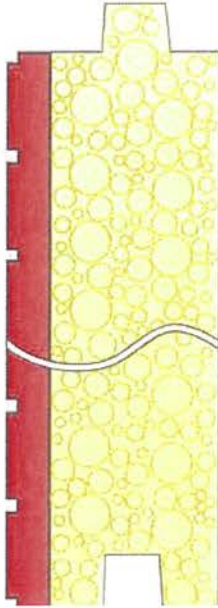
5.2 Koeseinät ja koejärjestelyt

5.2.1 Raketerm-julkisivuelementti

Raketerm-julkisivuelementti on pontattu tiililaattapintainen elementti, jonka taustana on polyuretaanin ja polystyreenin seoksesta tehty lämmöneristekerros (kuvat 5.6-5.8). Lämmöneristeen paksuus on 37 mm ja koko elementin paksuus on 46 tai 53 mm riippuen käytetystä tiililaatan paksuudesta. Julkisivuelementtiä tehdään $1261 \times 570 \text{ mm}^2$ tai $1313 \times 609 \text{ mm}^2$ kokoisina. Tämän tutkimuksen seinärakennekokeissa käytettiin kooltaan $1261 \times 570 \text{ mm}^2$ ja paksuudeltaan 46 mm olevia julkisivuelementtejä. Liitteessä 3 on esitetty valokuvia Raketerm-julkisivuelementistä.



Kuva 5.6 Raketerm-julkisivuelementti. Kuvassa numeroinnit tarkoittavat seuraavaa: 1. Vahvistekerros, 2. Lämmöneristekerros, 3. Asennusprikat, 4. Pinnoite.



Kuva 5.7 Leikkauskuva Raketerm-julkisivuelementistä.



Kuva 5.8 Yksi Raketerm-julkisivuelementti. Kyseistä elementtiä käytettiin laboratoriokokeessa seinärakenteessa 1A.

5.2.2 Koeseinät ja lähtökohdat eri koe-erien rakenneratkaisuille

Tutkittavia koeseiniä oli yhteensä yhdeksän kappaletta. Koeseinät tutkittiin kolmessa eri koeerässä siten, että jokaisessa rakennusfysikaalisessa kokeessa oli kolme koeseinää kerralla.

Koe-erässä 1 jokaisen seinärakenteen ulkomitat olivat $900 \times 1710 \text{ mm}^2$. Koe-erissä 2 ja 3 jokaisen seinärakenteen ulkomitat olivat $900 \times 1670 \text{ mm}^2$. Siten kolmesta rinnakkain olevasta koeseinästä koostuvan yhden koe-eräseinän ulkomitat olivat 1. koe-erässä $2700 \times 1710 \text{ mm}^2$ ja 2. ja 3. koe-erissä $2700 \times 1670 \text{ mm}^2$. Kokeissa olleiden seinärakenteiden rakennekuvat on esitetty liitteessä 2.

Ensimmäisessä koe-erässä (seinärakenteet 1A-1C) tutkittiin kaksi umpirakennetta ja yksi seinärakenne, jossa Raketerm-elementin sisäpuolella oli yhtenäinen tuuletusrako. Ensimmäisen koe-erän perusteella saatiin selville, että ulkoseinärakenne ei toimi riittävän hyvin ilman tuuletusta. Erityisesti seinärakenteissa 1A ja 1B Raketerm-elementin sisäpinnassa mitatut suhteellisen kosteuden arvot nousivat korkeiksi nopeasti kokeen aloittamisen jälkeen. Tämän vuoksi toiseen kokeeseen (seinärakenteet 2A-2C) valittiin kaksi tuuletettua seinärakennetta ja yksi umpirakenne, jossa Raketerm-elementin taustapintaan oli liimattu lisää EPS-eristystä. Toisen koe-erän seinärakenteiden sisäpuolista vesihöyrynvastusta myös lisättiin.

Kolmanteen koe-erään (seinärakenteet 3A-3C) valittiin yhdeksi rakenteeksi (seinärakenne 3A) lähes vastaava rakenne, kuin ensimmäisessä kokeessa (seinärakenne 1A) sillä erotuksella, että kolmannessa kokeessa käytettiin mm. sisäpuolista ilmansulkukalvoa rakenteen sisäpinnassa vastaavalla tavalla kuin koe-erässä 2. Seinärakenteen 2B tavoin myös kolmanteen koe-erään valittiin seinä (seinärakenne 3B), jossa Raketerm-elementin taustapinnassa oli tuuletusuritus. Tuuletusurituksen mitat ja jakosuhteet olivat erilaiset kuin koeseinässä 2B. Koeseinässä 3B käytettiin tiheämpää uritusta, jonka avulla pyrittiin saamaan tehokkaampi kosteuden poisto Raketerm-elementistä urittamattomien alueiden kohdalta ja toisaalta pienempiä uria, jotta ilman virtaus tapahtuisi urassa hitaammin ja samalla rakenteen lämmöneristyskyky olisi parempi. Yhdeksi rakenteeksi kolmanteen koe-erään valittiin umpirakenne (seinärakenne 3C).

Koe-erien 2 ja 3 seinien sisäpinnassa käytettiin koe-erän 1:n seinistä poiketen ilmansulkupaperia harkon sisäpinnassa. Tämä tuli tarpeelliseksi, koska koe-erän 1 tuloksista havaittiin, että seinän vesihöyrynvastus oli liian pieni. Todellisissa seinärakenteissa ei käytetä 100 mm:n harkkoa esimerkiksi ilman tasoite- tai rappauserrosta, jotka tuovat rakenteen sisäpintaan lisää vesihöyrynvastusta. Harkon sisäpintaan asennettiin yhtenäinen ilmansulkukalvo, jolla tässä tapauksessa pyrittiin mallintamaan paksumman harkon (jota normaalisti ulkoseinärakenteissa käytetään) ja

harkon sisäpintaan normaalisti levitettävän tasoitekerroksen vesihöyrynvastusta. Ilmansulkupaperin vesihöyrynvastusarvo saatiin tuotteen valmistajalta. Ilmansulkupaperia käytettäessä paperin ja 100 mm:n paksuisen harkon yhteinen vesihöyrynvastus vastasi vesihöyrynvastukseltaan rakennetta, jossa 200 mm paksuinen kevytsoraharkko on sisäpuolelta tasoitettu laastilla. Tasoitetta tai rappausta ei koeseinissä käytetty, jotta rakenteisiin ei tullut ylimääräistä kosteutta ja jotta sisäpuolen tarkka vesihöyrynvastus olisi tarkemmin määritettävissä myöhemmin tehtäviä laskennallisia tarkasteluja varten.

Koeseinien rakennekerrokset olivat seuraavanlaiset sisältä ulospäin:

SEINÄ 1A:

- Kevytsoraharkko 100 mm
- Mineraalivilla (kivivilla) 100 mm + pystypuurunko $50 \times 50 \text{ mm}^2$ k 900 + metallikiinnikkeet (pystyrunkopuun kohdalla mineraalivilla 50 mm)
- Raketerm-julkisivuelementti 46 mm

SEINÄ 1B:

- Kevytsoraharkko 100 mm
- EPS-eriste 100 mm
- Raketerm-julkisivuelementti 46 mm

SEINÄ 1C:

- Kevytsoraharkko 100 mm
- Mineraalivilla (kivivilla) 100 mm + pystypuurunko $50 \times 50 \text{ mm}^2$ k 900 + metallikiinnikkeet (pystyrunkopuun kohdalla mineraalivilla 50 mm)
- Tuuletusväli 10 mm
- Raketerm-julkisivuelementti 46 mm

SEINÄ 2A:

- Ilmansulkupaperi
- Kevytsoraharkko 100 mm
- EPS-eriste 50 mm
- EPS-eriste 25 mm
- EPS-eriste 25 mm liimattuna Raketerm-julkisivuelementtiin
- Raketerm-julkisivuelementti 46 mm

SEINÄ 2B:

- Ilmansulkupaperi
- Kevytsojaraharkko 100 mm
- EPS-eriste 75 mm
- S-uritettu EPS-eriste 25 mm liimattuna Raketerm-julkisivuelementtiin
- Raketerm-julkisivuelementti 46 mm

SEINÄ 2C:

- Ilmansulkupaperi
- Kevytsojaraharkko 100 mm
- Mineraalivilla (kivivilla) 75 mm + pystypuurunko $50 \times 75 \text{ mm}^2$ k 900 + metallikiinnikkeet
- Tyvek-pintainen mineraalivillatuulensuojalevy 30 mm
- Tuuletusrako 25 mm + $25 \times 25 \text{ mm}^2$ vaakapuurimat k260, l = 700 mm (joka toinen oikeassa reunassa ja joka toinen vasemmassa reunassa)
- Raketerm-julkisivuelementti 46 mm

SEINÄ 3A:

- Ilmansulkupaperi
- Kevytsojaraharkko 100 mm
- Mineraalivilla (kivivilla) 75 mm + pystypuurunko $50 \times 75 \text{ mm}^2$ k 900 + metallikiinnikkeet
- Tyvek-pintainen tuulensuojalevy 30 mm
- Tuuletusrako 10 mm
- Raketerm-julkisivuelementti 46 mm

SEINÄ 3B:

- Ilmansulkupaperi
- Kevytsojaraharkko 100 mm
- Mineraalivilla (kivivilla) 75 mm + pystypuurunko $50 \times 75 \text{ mm}^2$ k 900 + metallikiinnikkeet
- Tyvek-tuulensuojakalvo (lisättiin rakenteeseen talvijaksolla)
- S-uritettu EPS-eriste 25 mm liimattuna Raketerm-julkisivuelementtiin
- Raketerm-julkisivuelementti 46 mm

SEINÄ 3C:

- Ilmansulkupaperi
- Kevytsojarahkko 100 mm
- Mineraalivilla (kivivilla) 50 mm + pystypuurunko $50 \times 75 \text{ mm}^2$ k 900 + metallikiinnikkeet
- EPS-eriste 25 mm (irtonaisena)
- EPS-eriste 25 mm liimattuna Raketerm-julkisivuelementtiin
- Raketerm-julkisivuelementti 46 mm

5.2.3 Koeseinien rakentaminen, säilytys ja asentaminen

Koeseinät rakennettiin TTY:n talonrakennustekniikan rakennushallissa pääasiassa AS Raken työntekijöiden toimesta. Koeseinissä käytetty sisäpuolinen harkkoseinä (kuva 5.9) muurattiin teräspalkin päälle, jonka jälkeen harkkoseinä nostettiin teräspalkin kanssa säärasituslaitteistoon. Teräspalkin tarkoituksena oli ainoastaan tukea tutkittavaa seinärakennetta noston aikana. Ennen säärasituslaitteistoon nostamista harkkoseinä säilytettiin noin kuukauden ajan rakennushallin olosuhteissa ($\sim +20^\circ\text{C}$, 20...30 % RH). Säilytyksellä varmistettiin se, että harkkojen muurauksessa käytetty muurauslaasti ehti kuivumaan ennen kuin seinä asennettiin kokeeseen. Ennen jokaisen kokeen aloitusta harkon kosteuspitoisuus määritettiin punnitus-kuivaus-menetelmällä. Säärasituslaitteistossa harkkoseinään kiinnitettiin muut seinärakenteissa käytetyt materiaalit (mm. lämmöneristeet ja Raketerm-elementit). Seinärakenteiden rakentamisen yhteydessä rakenteisiin asennettiin kokeissa tarvittavat mittausturrit. Jokaisessa kokeessa (koe-erät 1-3) käytettiin samaa sisäpuolista harkkoseinää, joten sitä ei purettu kokeiden välissä pois. Kaikki muut rakenteissa käytetyt materiaalit vaihdettiin seinissä kokeiden välissä. Liitteessä 3 on esitetty valokuvia seinärakenteista ja niiden asentamisesta säärasituslaitteistoon.

Seinärungon asentamisen jälkeen koeseinien ja säärasituslaitteiston seinien ja katon väliset liitoskohdat tiivistettiin EPS-eristeellä, polyuretaanivaahdotuksella ja muovilla. Koeseinän alla olevan teräspalkin alle asennettiin polyuretaanilevy. Sen lisäksi teräspalkki verhoitiin sivuilta EPS-eristeellä, jotta teräspalkin mahdollinen kylmäsiltaavaikutus voitiin eliminoida pois. Koeseinässä eri seinärakenteiden väliset liitoskohdat eristettiin toisistaan apupuiden lisäksi muovikalvolla, EPS-eristeellä ja polyuretaanivaahdotuksella (kuva 5.10).



Kuva 5.9 Harkkoseinä muurattuna teräspalkin päälle ennen säärasisustuslaitteistoon nostamista.



Kuva 5.10 Seinärakenteiden väliset liitoskohdat eristettiin EPS-eristekaistalla, muovilla ja polyuretaanivaahdotuksella toisistaan koko rakenteen syvyysuunnassa, jotta kosteus ja lämpö eivät siirtyisi vaakasuunnassa rakenteesta toiseen.

5.2.4 Mitattavat suureet, mittauspaikat ja antureiden asennukset

Rakennusfysikaalisissa kokeissa mitattiin ulko- ja sisäilman olosuhteita sekä tutkittavien rakenteiden RH- ja lämpötilaolosuhteita. Koe-erässä 1 (seinät 1A-1C) rakenteiden pintoihin ja sisälle asennettiin yhteensä 30 kappaletta (10 kpl/ rakenne) ja koe-erissä 2 ja 3 (seinät 2A-2C ja seinät 3A-3C) yhteensä 33 kappaletta (11 kpl/ rakenne) yksittäisiä pintalämpötila-antureita sekä RH/ T -antureita.

Pintalämpötila-anturit kiinnitettiin materiaalien pintoihin Termo-massalla, joka muodostaa rakenteen pinnan ja mittausanturin välille mahdollisimman pienen lämmönvastuksen. Rakenteiden sisälle lämmöneristeiden rajapintoihin asennetut RH- ja lämpötila-anturit asennettiin rakenteen syvyysuunnassa tarkasteltuna niin, että anturin keskiosa oli lämmöneristeiden välisen rajapinnan kohdalla, jolloin saatava mittautulos kertoi mahdollisimman tarkasti rajapinnan olosuhteet. Siitä syystä tutkittavan rajapinnan molempiin lämmöneristemateriaaleihin tehtiin anturia varten loveukset/ uritukset. Poikkeuksena oli Raketerm-elementin taustapinnan polyuretaani /-styreeni -eristekerroksen ja varsinaisen seinärakenteen lämmöneristeen välinen rajapinta, jossa anturi lovettiin kokonaan varsinaiseen lämmöneristeeseen. Myöskään harkon ulkopintaan ei tehty loveusta, vaan ko. rajapinnassa anturi sijaitsi kokonaan lämmöneristeen puolella. Myös anturien johdotuksille tehtiin uritukset, jotta mm. kovat lämmöneristeet saatiin asennettua toisiinsa kiinni siten, että johto ei aiheuttanut ilmarakoa eristeiden väliin. Tuuletusurista ja -raoista tehdyt RH-/ lämpötilamittaukset tehtiin syvyysuunnassa mahdollisimman keskeltä tuuletusuraa ja -rakoa.

Seinärakenteiden 1C ja 2C tuuletusrakoihin sekä seinärakenteiden 2B ja 3B tuuletusuriin asennettiin lisäksi ilmavirtausanturi. Ilmavirtausanturi sijaitsi rakenteen syvyysuunnassa mahdollisimman lähellä tuuletusraon tai -uran keskiosaa.

Jokaisen seinärakenteen läpi johtumalla siirtyvän lämpövirran mittaamiseen käytettiin lämpövirtalevyjä (1 kpl/ rakenne). Koe-erissä 2 ja 3 rakenteiden sisäpinnoista tehdyt pintalämpötila- ja lämpövirtalevymittaukset tehtiin harkon sisäpinnasta eikä ilmansulkupaperin pinnasta. Lämpövirtalevyt sijaitsivat jokaisen seinärakenteen keskellä. Lämpövirtalevyt kiinnitettiin seinään levyjen päälle asennetun muovilevyn avulla. Muovilevy kiinnitettiin harkkoseinään ruuveilla. Lämpövirtalevyn ja harkon väli täytettiin lämmönjohtomassalla, jotta lämpövirtalevyn ja harkon välisen rajapinnan ilmataskut voitiin eliminoida. Lämpövirtalevyistä mittaukset tehtiin kerran minuutissa ja tulokset tallennettiin erilliseen tietokoneeseen.

Rakenteiden ulkopinnoilta mitattiin lisäksi pintalämpötiloja termolangoilla, joiden avulla ohjattiin kevätyksellä säärasituslaitteiston säteilylämpötilaa.

Kokeen aikana seurattavia suureita olivat seuraavat:

- lämpötilat sisällä, ulkona, rakenteessa ja pinnoilla (T) [°C]
- ilman suhteellinen kosteus sisällä, ulkona ja rakenteen huokostilassa (RH) [%]
- ilman virtausnopeus rakenteiden 1C, 2B, 2C ja 3B tuuletusraoissa /-urissa (r_a) [m/s]
- lämpövirran tiheys koerakenteen läpi (q) [W/m²]

Antureiden paikat rakenteissa on esitetty tarkemmin liitteen 2 kuvissa.

5.2.5 Mitattujen suureiden epävarmuudet

Taulukossa 5.1 on esitetty kokeessa mitattujen suureiden mittausepävarmuudet. Lämpötilojen ja suhteellisten kosteuksien mittausepävarmuudet voivat olla joissakin tapauksissa taulukossa ilmoitettuja arvoja suuremmat johtuen mittauksessa käytetyn AD/DA -muuntimen epävarmuudesta.

Taulukko 5.1 Mitattujen suureiden mittausepävarmuudet.

Suure	Mittausepävarmuus
Lämpötila (TTY:n anturit)	±0,4 °C
Lämpötila (Vaisalan anturit)	±0,1 °C (20 °C) ±0,005 °C/°C
Suhteellinen kosteus (TTY:n anturit)	±5,0 % RH (T ≥ 0 °C)
Suhteellinen kosteus (Vaisalan anturit)	±2,0 % RH (0 to 90 % RH) ±3,0 % RH (90 to 100 % RH)
Ilmavirran nopeus	±0,1 m/s + 3 % lukemasta
Lämpövirran tiheys	5 % lukemasta

5.2.6 Koeolosuhteet

Sisä- ja ulkoilman tavoiteolosuhteet kokeen aikana on esitetty taulukossa 5.2. Jokaisella koe-erällä oli samat tavoiteolosuhteet.

Syksy- ja talvijaksot ajettiin vakio-olosuhteissa. Kevätjaksolla lämpötilaa muutettiin syklisesti yhden vuorokauden jaksoissa. Lämpötilan säätö tapahtui portaittain siten, että vuorokausi oli jaettu kahteentoista eri lämpötila-alueeseen (-6, -4, 0, 3, 6, 8, 10, 8, 6, 3, 0, -4, -6) (°C), joiden kesto vaihteli yhdestä kolmeen tuntiin. Tavoitteena oli saada

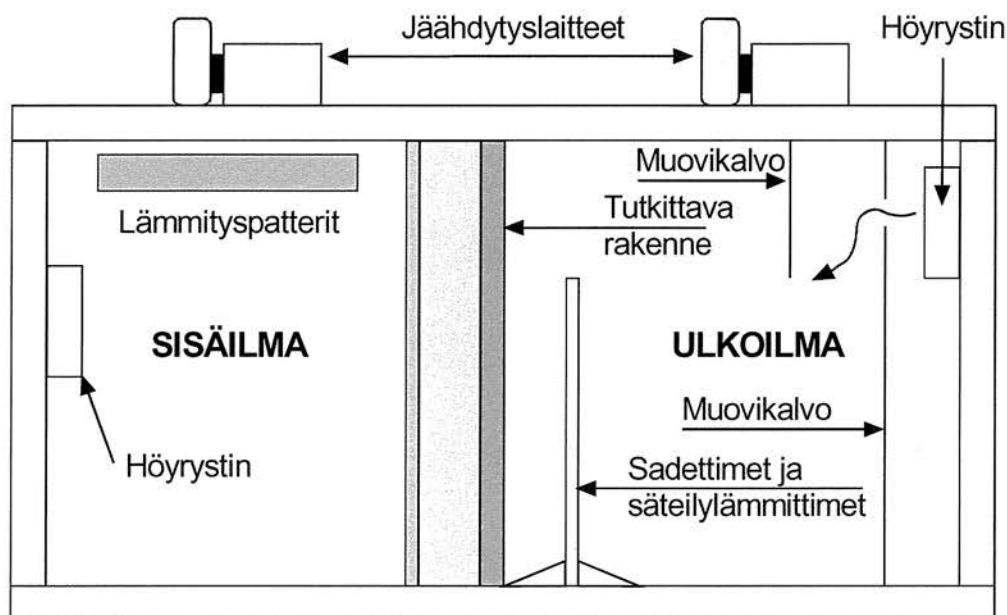
mahdollisimman lineaarisesti nouseva/ laskeva jatkuva lämpötilamuutos. Sisäilman kosteuslisä oli tarkoitus valita kokeisiin siten, että se vastasi todellista ($4 - 6 \text{ g/m}^3$) kosteuslisän mitoitussarvoa pientaloissa pohjoismaisissa ilmasto-olosuhteissa (Vinha et al. 2005).

Sisäilman kosteuslisänä pyrittiin pitämään jokaisessa koe-erässä noin 4 g/m^3 . Säärasituslaitteistossa kosteuslisän tarkka säätäminen varsinkin talvella (pakkaskausi) ja keväällä (syklinen lämpötilan säätö) ei ole mahdollista, joten kokeen aikana kosteuslisä vaihteli syksy- ja talvijaksolla koe-erästä riippuen $3 - 5 \text{ g/m}^3$ ja kevätjaksolla $1 - 7 \text{ g/m}^3$ (ks. tarkemmin kohdat 6.2.2, 6.3.2 ja 6.4.2).

Taulukko 5.2 Kokeiden tavoiteolosuhteet.

Vuodenaika	Sisäpuoli		Ulkopuoli	
	T [°C]	RH [%]	T [°C]	RH [%]
Syksy	+20	62	+7	85
Talvi	+20	35	-10	90
Kevät	+20	46	+10...-6 (k.a. +2)	50...90 (k.a. 70)

Ulkokammion kosteudensäädössä syksyjaksoilla apuna käytettiin muovikalvoa, jolla estettiin kosteuden kondensoituminen höyrystimien pintoihin (kuva 5.11). Tällöin ulkoilman suhteellinen kosteus kyettiin pitämään suunnitellun korkeana syysjakson aikana. Muovikalvo asetettiin höyrystinpatterien eteen koko matkalle katosta lattiaan. Muovikalvon yläosaan molempien höyrystimien eteen tehtiin noin $20 \times 50 \text{ mm}^2$ kokoiset aukot, joista höyrystimiltä tuleva kylmä ilma puhallettiin ulkokammioon. Talvi- ja kevätjaksojen aikana muovikalvoa ei käytetty.



Kuva 5.11 Säärasituslaitteisto syksyjaksoilla. Ulkokammion höyrystimien edessä on muovikalvo. Muovikalvon yläosassa on aukot, joista höyrystimeltä tuleva kylmä ilmavirta pääsee ulkokammioon.

5.2.7 Tutkimusajankohta

Ensimmäinen rakennusfysikaalinen koe (koe-erä 1) suoritettiin 5.7. - 16.8.2005 välisenä aikana siten, että ensimmäisenä ollut syksyjakso kesti noin 15 vrk, sen jälkeen ollut talvijakso noin 12 vrk ja viimeisenä ollut kevätjakso noin 15 vrk. Toinen rakennusfysikaalinen koe (koe-erä 2) tehtiin 14.11. - 22.12.2005 välisenä aikana siten, että syksyjakso kesti noin 16 vrk, talvijakso noin 11 vrk ja kevätjakso noin 10 vrk. Kolmas rakennusfysikaalinen koe (koe-erä 3) tehtiin 25.1. - 15.3.2006 välisenä aikana siten, että syksyjakso kesti noin 21 vrk. Syksyjakson jälkeinen talvijakso kesti aluksi yhtäjaksoisesti 5 vrk (15.2 - 20.2). Tämän jälkeen talvijakso keskeytettiin noin yhdeksi vuorokaudeksi, koska seinärakennetta 3B korjattiin lisäämällä rakenteeseen kivivillan ulkopintaan Tyvek-kalvo. Tyvek-kalvo lisättiin rakenteeseen, koska talvijakson aikana havaittiin seinärakenteen 3B:n alaosassa rakenteen sisäpinnan jäähtyvän voimakkaasti ulkoapäin tulevan kylmän ilmavirtauksen takia. Korjauksen jälkeen talvijakso jatkui noin 4 vrk (21.2 - 25.2). Tämän jälkeen 25.2. - 26.2.2006 välisenä aikana koe- ja mittaustuloksissa oli sähkökatkos, jolloin tietokone ei rekisteröinyt mittauksia. Myös säärasituslaitteisto oli sähkökatkoksen ajan pois päältä, jolloin ulkokammion lämpötila nousi selvästi talvijakson noin -10°C :sta ylöspäin. Koetta jatkettiin talvijakson olosuhteilla tämän jälkeen vielä noin 9 vrk (27.2 - 7.3). Viimeisenä ollut kevätjakso kesti noin 8 vrk (7.3 - 15.3).

6 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

6.1 Yleistä

Kokeiden tulokset on esitetty kohdissa 6.2-6.4. Taulukoissa olevat tulokset on laskettu koejakson viimeisen 6 tunnin keskiarvoina 5 minuutin välein tallennetusta mittausdatasta. Kevätjaksojen tuloksissa on selviä eroja koe-erien välillä. Tämä johtuu erityisesti syklisen kevätjakson lopetusajankohdasta. Keskiarvotulokset riippuvat siitä minkälainen sykli on osunut viimeisen 6 tunnin ajalle, josta tulokset on laskettu. Kohtien 6.2-6.4 kuvaajat on tehty 5 minuutin välein tallennetusta mittausdatasta lukuun ottamatta lämpövirtalevymittauksia. Lämpövirtalevymittauksissa kuvaajat on tehty yhden minuutin välein tallennetusta mittausdatasta yhden vuorokauden mittaustulosten keskiarvoina.

Muutamissa kuvaajissa (käyrissä) on havaittavissa piikkejä. Piikit kuvaajissa johtuvat joko laitteiston säätöjärjestelmän toiminnoista olosuhteiden tasoittumisprosessin aikana, ulkopuolella olevan ison jäähdytyskennon käytöstä (isoa jäähdytyskennoa tarvittiin alle 0 °C:n lämpötiloissa) tai säteilylämmittimien päälläolosta. Piikit ovat keskimäärin ajallisesti hyvin lyhyitä, eikä niillä ole tulosten kokonaisuuden kannalta merkitystä. Lisäksi esimerkiksi talvijaksolla suhteellisen kosteuden käyrissä on vaihtelua vaikka lämpötila ei merkittävästi vaihdellutkaan, koska ulkoilman suhteellista kosteutta ei voitu säätää alle 0 °C:n lämpötiloissa.

Jokaisen koe-erän tuloksissa olevat sisätilan lämpötilat ja suhteelliset kosteudet on laskettu kahden anturin keskiarvosta. Toinen anturi, joka kuului varsinaiseen mittauslaitteistoon, mittasi sisäilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta noin 0,1 m:n etäisyydellä (vaakaetäisyys) rakenteen sisäpinnasta ja noin 0,5 m:n korkeudelta lattiapinnasta. Mittaus tapahtui 5 minuutin välein. Sisäilman olosuhteita mittaava dataloggeri tallensi lämpötila- ja kosteusolosuhteita 15 minuutin välein. Loggeri sijaitsi noin 1,0 m:n korkeudella lattiapinnasta koeseinien 1C, 2C ja 3C läheisyydessä.

Ulkoilman lämpötila mitattiin kaikissa koe-erissä noin metrin etäisyydeltä (vaakaetäisyys) rakenteen ulkopinnasta ja noin 1,2 m:n korkeudelta lattiapinnasta yhdellä mittauslaitteistoon kuuluvalla mittaasanturilla.

Sisä- ja ulkoilman vesihöyrypitoisuudet laskettiin 5 minuutin välein mitattujen suhteellisten kosteuksien ja lämpötilojen avulla Hylandin & Wexlerin (1983) kehittämällä kaavalla.

Tutkimuksessa käytössä ollut ilmapirtamittari mittasi ilmapirran nopeutta 0-1 m/s välisellä alueella. Käytännössä on kuitenkin havaittu, että mittari alkaa reagoimaan vasta 0,05 m/s ylittävillä ilmapirran nopeuksilla.

Lämpövirtalevymittauksissa tulee huomioda se, että sisätilan lämpötilan pienikin muutos aiheutti lämpövirtalevyihin selvän muutoksen. Säärasituslaitteistossa sisätilan lämpötilan säätö on jatkuvatoiminen prosessi, jossa lämpötila vaihtuu jonkin verran tavoitearvon eri puolilla. Lämpövirtalevyistä saatiin ajoittain yksittäisiä negatiivisia arvoja, koska seinärakenteen sisäpinta oli hetkellisesti lämpimämpi kuin sisäilma. Tällöin lämpövirran suunta oli rakenteesta sisälle päin eikä ulospäin, kuten tilanne normaalisti on. Jotta lämpövirtalevymittauksen tulokset olisivat järkevästi luettavissa, otettiin mittauksista tulokset yhden vuorokauden keskiarvoina. Seinärakenteiden sisä- ja ulkopinnasta mitattujen pintalämpötilojen sekä lämpövirtalevymittauksesta saatujen lämpövirran tiheyksien avulla laskettiin kunkin seinän lämmönvastus (R). Lämmönvastuksen R tulisi olla eri lämpötilaolosuhteissa melko samanlainen, koska siinä otetaan huomioon myös lämpötilojen muutokset rakenteen eri puolilla.

Lämmönvastus (R) laskettiin seuraavalla kaavalla:

$$R = \frac{T_{sp} - T_{up}}{q}$$

missä

R	lämmönvastus ($m^2 \cdot K/W$)
T_{sp}	lämpötila rakenteen sisäpinnassa ($^{\circ}C$)
T_{up}	lämpötila rakenteen ulkopinnassa ($^{\circ}C$)
q	lämpövirran tiheys (W/m^2)

Laskennassa käytettiin pintalämpötiloina seinän ylä- ja alaosasta mitattuja keskiarvoja siten, että seinän ylä- ja alaosan 5 minuutin välein tallennetuista mittausdatoista otettiin molemmista vuorokautiset keskiarvot ja tämän jälkeen näistä keskiarvoista laskettiin seinän ylä- ja alaosan keskiarvo. Tämä kuvasi todellisia lämpötiloja seinän keskiosassa, josta myös lämpövirtalevymittaus tehtiin.

6.2 Koe-erä 1 (seinät 1A-1C)

6.2.1 Rakenteiden lämpötilat

Jokaisen koejakson lopusta lasketut 6 tunnin keskiarvot on esitetty taulukoissa 6.1-6.4. Kuvissa 6.1-6.4 on esitetty vastaavista antureista mitatut lämpötilat koko kokeen ajalta.

Taulukoissa 6.1-6.4 ja kuvissa 6.1-6.4 esitetyt lyhenteet tarkoittavat seuraavia mittaushkohtia (tarkemmat anturien paikat on merkitty liitteessä 2 oleviin kuviin):

S_Pinta_Y	= sisäpinnan pintalämpötila seinän yläosassa
ES_Pinta_Y	= eristeen sisäpinta seinän yläosassa
EU_Pinta_Y	= eristeen ulkopinta seinän yläosassa (seinärakenteessa 1C tuuletusväli)
JS_S_Pinta_Y	= julkisivuelementin sisäpinnan pintalämpötila seinän yläosassa
JS_U_Pinta_Y	= julkisivuelementin ulkopinnan pintalämpötila seinän yläosassa
S_Pinta_A	= sisäpinnan pintalämpötila seinän alaosassa
ES_Pinta_A	= eristeen sisäpinta seinän alaosassa
EU_Pinta_A	= eristeen ulkopinta seinän alaosassa (seinärakenteessa 1C tuuletusväli)
JS_S_Pinta_A	= julkisivuelementin sisäpinnan pintalämpötila seinän alaosassa
JS_U_Pinta_A	= julkisivuelementin ulkopinnan pintalämpötila seinän alaosassa

Taulukoissa 6.1-6.4 olevat alkutilanteen lämpötilat ovat alle 20 °C (lukuun ottamatta sisäpinnan lämpötiloja), koska syysolosuhdekoe käynnistettiin säärasituslaitteistossa ennen mittauksen käynnistystä.

Taulukko 6.1 Lämpötilat sisällä ja ulkona (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

Jakso	T_Sisä	T_Ulko
Alkutilanne	20,6	9,1
Syksy	20,3	7,4
Talvi	20,5	-9,3
Kevät	19,9	0,1

Taulukko 6.2 Lämpötilat rakenteessa 1A antureittain (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

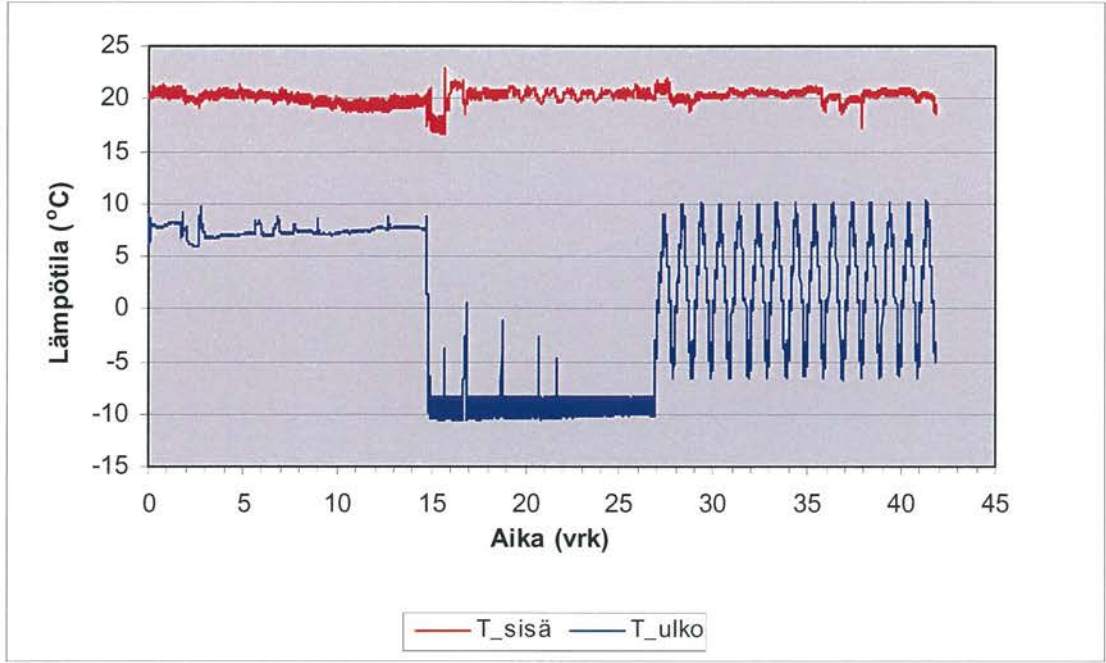
Jakso	S_Pinta_Y	ES_Pinta_Y	EU_Pinta_Y	JS_S_Pinta_Y	JS_U_Pinta_Y	S_Pinta_A	ES_Pinta_A	EU_Pinta_A	JS_S_Pinta_A	JS_U_Pinta_A
Alkutilanne	20,5	20,7	13,0	11,9	8,1	20,2	19,3	12,3	11,1	8,0
Syksy	19,1	19,4	11,9	10,5	6,0	19,4	18,2	11,6	10,0	6,0
Talvi	21,1	19,0	-0,5	-0,7	-9,5	21,0	18,0	-0,5	-1,7	-9,9
Kevät	19,4	18,9	6,9	6,3	-0,7	20,3	18,9	7,6	6,1	-0,7

Taulukko 6.3 Lämpötilat rakenteessa 1B antureittain (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

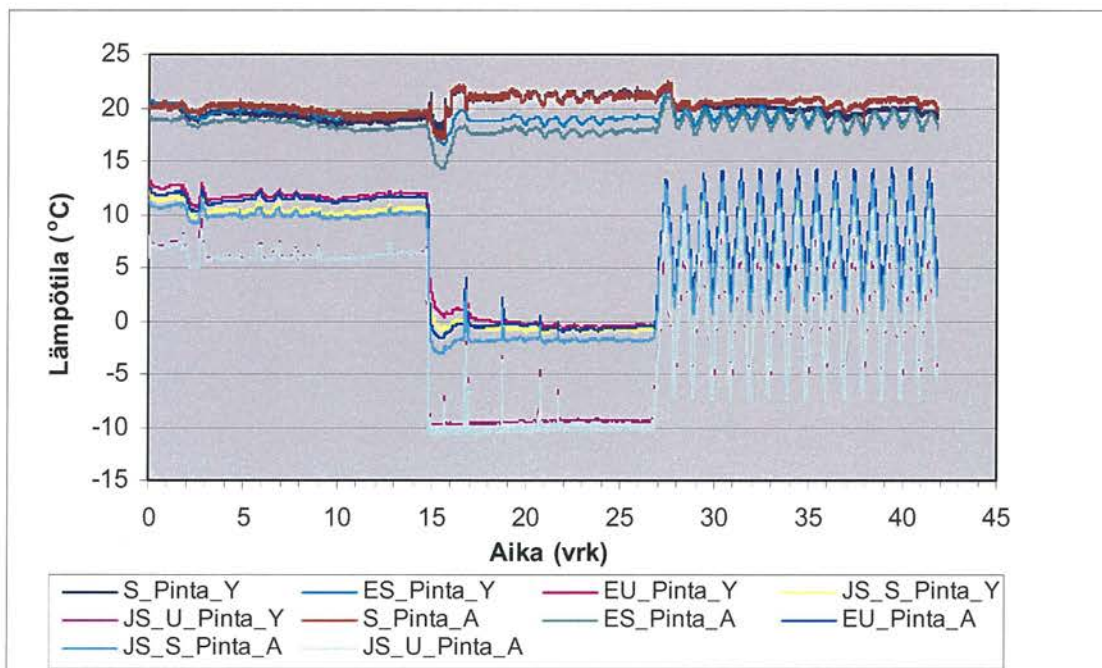
Jakso	S_Pinta_Y	ES_Pinta_Y	EU_Pinta_Y	JS_S_Pinta_Y	JS_U_Pinta_Y	S_Pinta_A	ES_Pinta_A	EU_Pinta_A	JS_S_Pinta_A	JS_U_Pinta_A
Alkutilanne	20,8	18,8	12,8	11,4	8,1	20,5	18,7	12,7	11,6	8,0
Syksy	19,1	17,7	11,8	10,0	6,0	19,3	17,6	12,0	10,2	6,1
Talvi	19,9	16,3	0,6	-1,4	-9,7	20,2	16,4	1,0	-1,0	-9,8
Kevät	19,2	17,3	7,4	5,6	-1,0	19,6	17,3	7,7	5,9	-0,9

Taulukko 6.4 Lämpötilat rakenteessa 1C antureittain (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

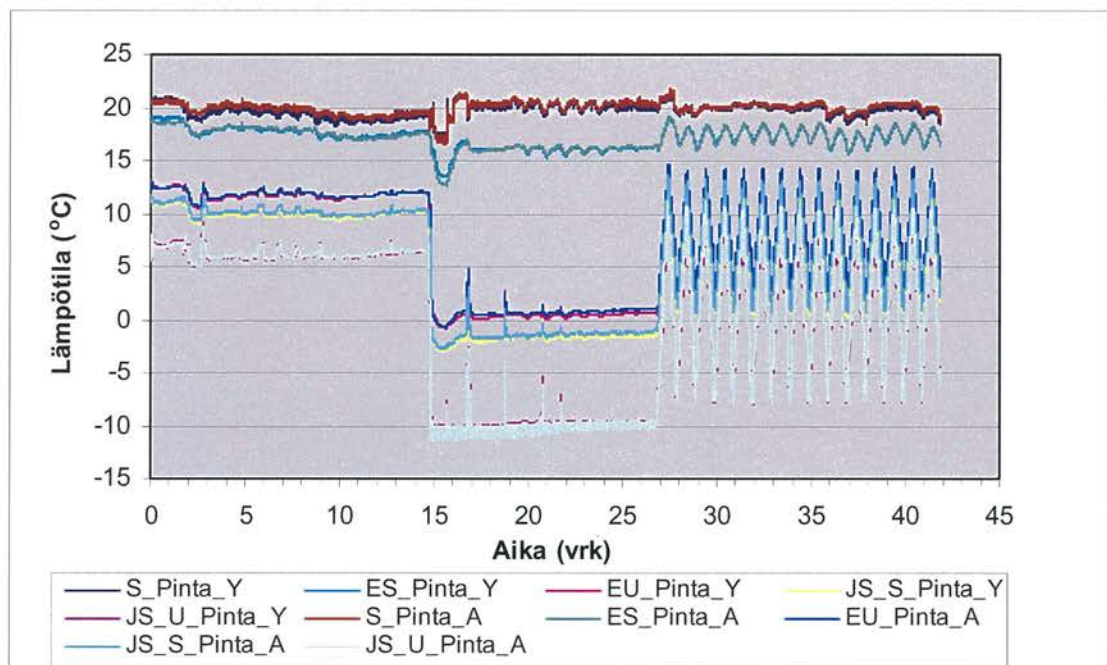
Jakso	S_Pinta_Y	ES_Pinta_Y	EU_Pinta_Y	JS_S_Pinta_Y	JS_U_Pinta_Y	S_Pinta_A	ES_Pinta_A	EU_Pinta_A	JS_S_Pinta_A	JS_U_Pinta_A
Alkutilanne	20,4	19,0	10,5	9,0	7,9	19,9	16,2	9,7	8,8	7,9
Syksy	18,5	18,2	9,9	7,9	6,2	18,5	16,6	9,4	8,3	6,3
Talvi	19,8	19,6	-2,6	-5,5	-9,7	18,9	13,6	-7,1	-8,0	-9,5
Kevät	19,0	18,2	2,6	0,9	-1,0	18,8	15,9	3,3	2,5	-0,4



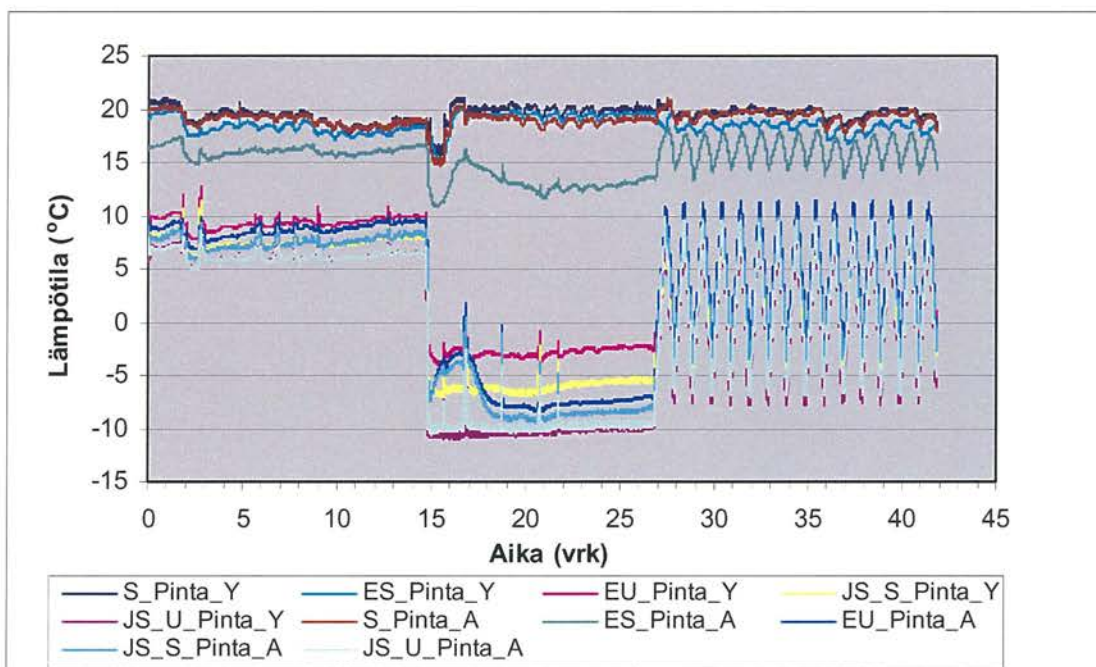
Kuva 6.1 Sisä- ja ulkolämpötilat koe-erän 1 aikana.



Kuva 6.2 Seinärakenteen 1A lämpötilat kokeen aikana.



Kuva 6.3 Seinärakenteen 1B lämpötilat kokeen aikana.



Kuva 6.4 Seinärakenteen 1C lämpötilat kokeen aikana.

Koe-erässä 1 lämpötilojen osalta jokaisessa rakenteessa ja kaikissa koeolosuhteissa saavutettiin stationääritila. Seinärakenteessa 1A sekä seinän ylä- että alaosassa talvijaksolla lopulliset sisäpinnan lämpötilat olivat noin 1 °C seinärakenteen 1B ja noin 2 °C seinärakenteen 1C sisäpinnan lämpötiloja korkeampia. Tämä johtui siitä, että sisäpuolelle (sisäkammioon) asennettu lisälämmityspuhallin puhalsi ilmaa jonkin verran enemmän seinärakenteen 1A sisäpintaa kohti. Samasta syystä seinärakenteen 1A sisäpinnan lämpötila oli talvijaksolla myös jonkin verran sisäilman lämpötilaa korkeampi.

Jokaisesta rakenteesta mitatut lopulliset ulkopintojen pintalämpötilat olivat syysjaksolla noin 1-1,5 °C, talvijaksolla 0,2-0,6 °C ja kevätjaksolla 0,5-1,1 °C alhaisempia kuin ulkoilman lämpötila.

Seinärakenteen 1A yläosassa lämmöneristeen sisäpinnassa oleva lämpötila-anturi (ES_Pinta_Y) näytti koko kokeen ajan jonkin verran oletettua korkeampia lämpötiloja. Tämä lämpötilaero johtui lämpötila-anturin mittauserävarmuudesta ja osittain myös mineraalivillakerroksessa tapahtuvasta sisäisestä konvektiosta (ks. kohta 2.1.3). Syysjaksolla lämmöneristeen sisäpinnan lämpötila oli jopa hieman korkeampi kuin rakenteen sisäpinnan lämpötila (19,4 °C vs. 19,1 °C).

Seinärakenteessa 1C seinän alaosassa tuuletusraon lämpötilat olivat jonkin verran ulkolämpötiloja korkeampia. Seinärakenteessa 1C seinän yläosasta mitattiin alaosaan lämpimämpiä lämpötiloja lähes poikkeuksetta jokaisessa mittauspisteessä. Selvemmin eroa tuli talvijaksolla sekä lämmöneristeen sisäpinnassa että lämmöneristeen

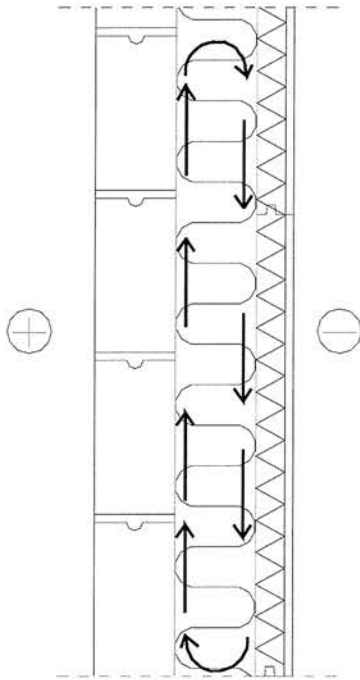
ulkopinnassa (tuuletusraossa). Lämmöneristeen sisäpinnan lämpötila oli seinän yläosassa 6,0 °C korkeampi (19,6 °C vs. 13,6 °C) ja lämmöneristeen ulkopinnassa (tuuletusraossa) 4,5 °C korkeampi (-2,6 °C vs. -7,1 °C). Tästäkin ilmiöstä osan selittää mineraalivillassa tapahtuva sisäinen konvektio.

Erään tutkimuksen perusteella sisäinen konvektio ei kuitenkaan yksistään aiheuta näin suuria lämpötilaeroja (Ojanen & Kohonen 1989). Tässä tapauksessa suuret lämpötilaerot seinärakenteen 1C ylä- ja alaosan välillä johtuvat suuremmaksi osaksi säärasituslaitteiston jäähdytyskennon puhaltimista, jotka ohjainlevyn takia puhalsivat jäähdytetyn ilmavirran enemmän kohti seinän keski- ja alaosaa. Tällöin kylmä ilmavirta pääsi seinän alareunasta tuuletusraon alaosaan sekä lisäksi seinän alaosaan mineraalivillan sisään jäähdyttäen myös mineraalivillan sisäpintaa ja lisäten mineraalivillassa tapahtuvaa sisäistä konvektiota (kuva 6.5). Tämä oli mahdollista, koska kokeessa ei käytetty mineraalivillan ulkopinnassa mitään tuulensuojamateriaalia.

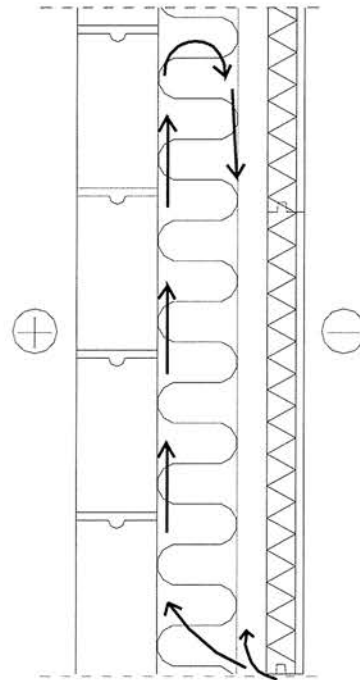
Näin suuret lämpötilaerot seinän ala- ja yläosan välillä kertovat myös siitä, että ilma ei ole ko. tuuletusraossa liikkunut riittävästi. Samaa asiaa puoltaa seinän yläosasta saadut korkeammat suhteellisen kosteuden arvot sekä ilmavirtausmittarista mitatut vain ns. kynnyсарvot (ks. kohdat 6.2.3 ja 6.2.4). Seinän 1C yläosassa tuuletusvälissä oleva seisova ilma on voinut toimia myös lisälämmöneristeenä talviolosuhteissa. Tätä seikkaa puoltaa lämpövirtalevyllä mitattu seinärakenteen 1C läpi siirtyvä lämpövirta, joka oli talvella pienempi kuin tuuletusraottomissa rakenteissa 1A ja 1B (ks. kohta 6.2.5). Toisaalta puhalluksen aiheuttaman sisäisen konvektion pitäisi heikentää rakenteen 1C lämmöneristävyttä jonkin verran.

Seinärakenteen 1B lämpötilatuloksissa ei havaittu merkittäviä poikkeamia. Seinärakenteen 1B ylä- ja alaosien lämpötilat olivat keskenään samansuuruisia ja siltäkin osin loogisia.

SISÄINEN KONVEKTIO
SEINÄSSÄ 1A



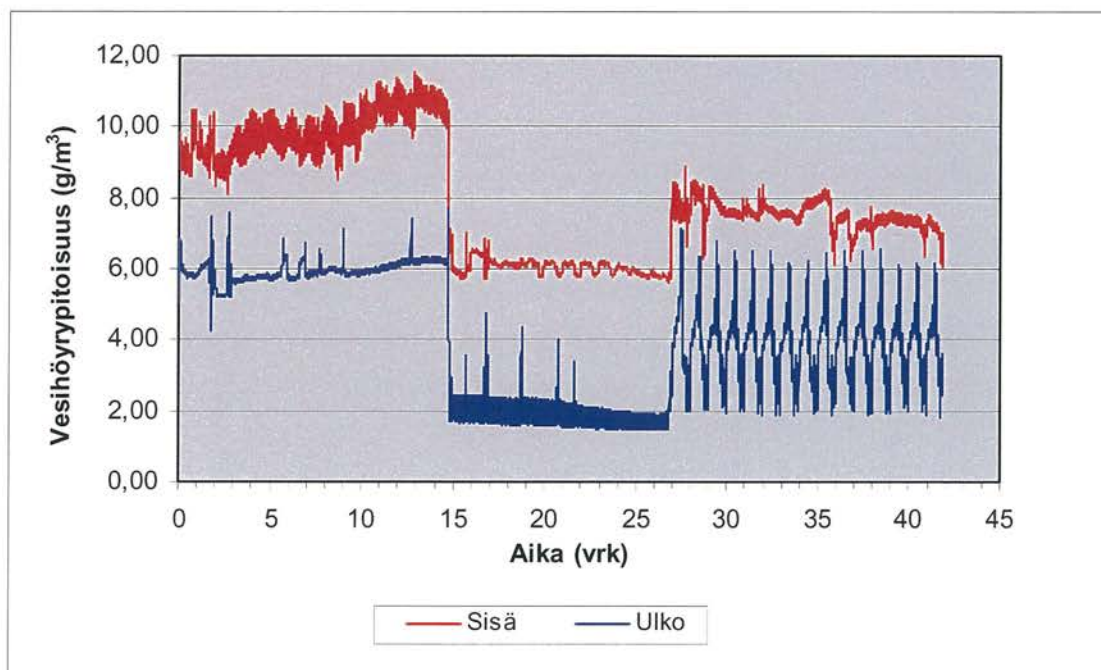
SISÄINEN KONVEKTIO +
PAKOTETTU KONVEKTIO
SEINÄSSÄ 1C



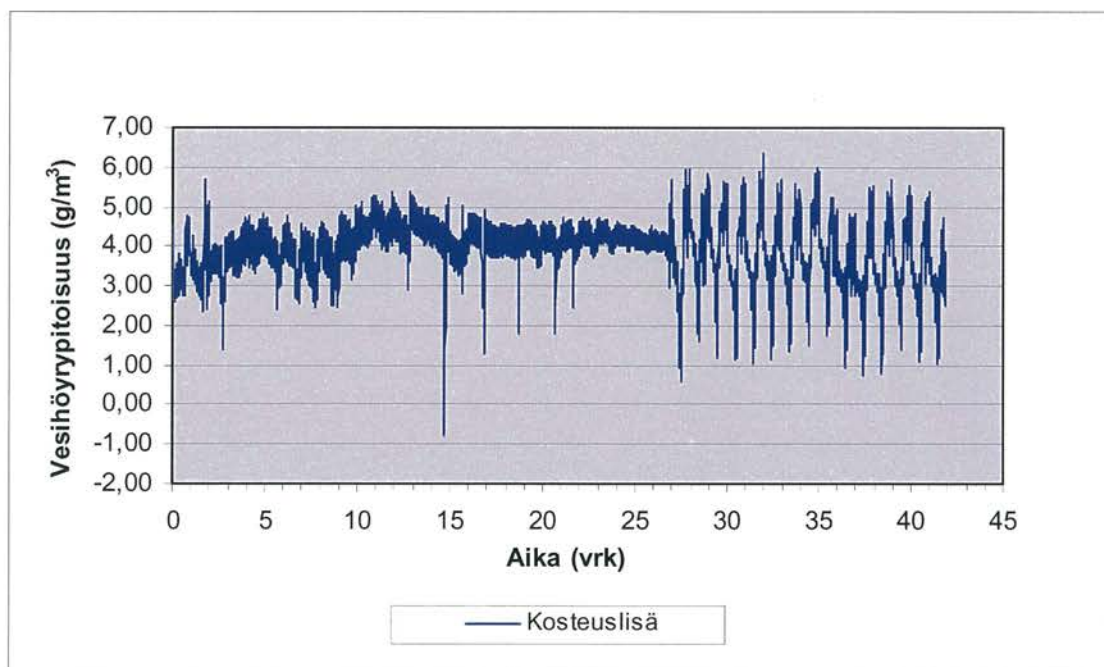
Kuva 6.5 Periaatekuva rakenteiden 1A ja 1C mineraalivillan sisäisistä konvektiovirtauksista.

6.2.2 Vesihöyrypitoisuudet ja kosteuslisä

Koe-erän 1 sisä- ja ulkoilman kokeen aikaiset vesihöyrypitoisuudet on esitetty kuvassa 6.6 ja kosteuslisä kuvassa 6.7.



Kuva 6.6 Sisä- ja ulkoilman vesihöyrypitoisuudet koe-erä 1:n aikana.



Kuva 6.7 Kosteuslisä koe-erä 1:n aikana.

Koe-erä 1:n aikana todellinen kosteuslisä vaihteli syksy- ja talvijaksolla pääsääntöisesti 3-5 g/m^3 välillä ja kevätjaksolla 1-6 g/m^3 välillä. Koko kokeen aikana 5 minuutin välein tallennetusta mittausdatasta laskettuna kosteuslisän keskiarvo oli 3,88 g/m^3 . Kosteuslisä jäi siten jonkin verran suunniteltua alhaisemmaksi.

6.2.3 Suhteelliset kosteudet rakenteissa

Jokaisen jakson lopusta lasketut 6 tunnin keskiarvot on esitetty taulukoissa 6.5-6.8. Kuvissa 6.8-6.11 on esitetty vastaavista antureista mitatut suhteelliset kosteudet koko kokeen ajalta.

Taulukoissa 6.5-6.8 ja kuvissa 6.8-6.11 esitetyt lyhenteet tarkoittavat seuraavia rakenteen suhteellisen kosteuden mittaushetkiä (tarkemmat anturien paikat on merkitty liitteessä 2 oleviin kuviin):

- ES_Pinta_Y = eristeen sisäpinta seinän yläosassa
 EU_Pinta_Y = eristeen ulkopinta seinän yläosassa (seinärakenteessa 1C tuuletusväli)
 ES_Pinta_A = eristeen sisäpinta seinän alaosassa
 EU_Pinta_Y = eristeen ulkopinta seinän alaosassa (seinärakenteessa 1C tuuletusväli)

Taulukko 6.5 Suhteelliset kosteudet sisällä ja ulkona (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

Jakso	RH_Sisä	RH_Ulko
Alkutilanne	52,4	72,1
Syksy	60,1	78,3
Talvi	34,3	68,8
Kevät	41,5	64,9

Taulukko 6.6 Suhteelliset kosteudet rakenteessa 1A antureittain (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

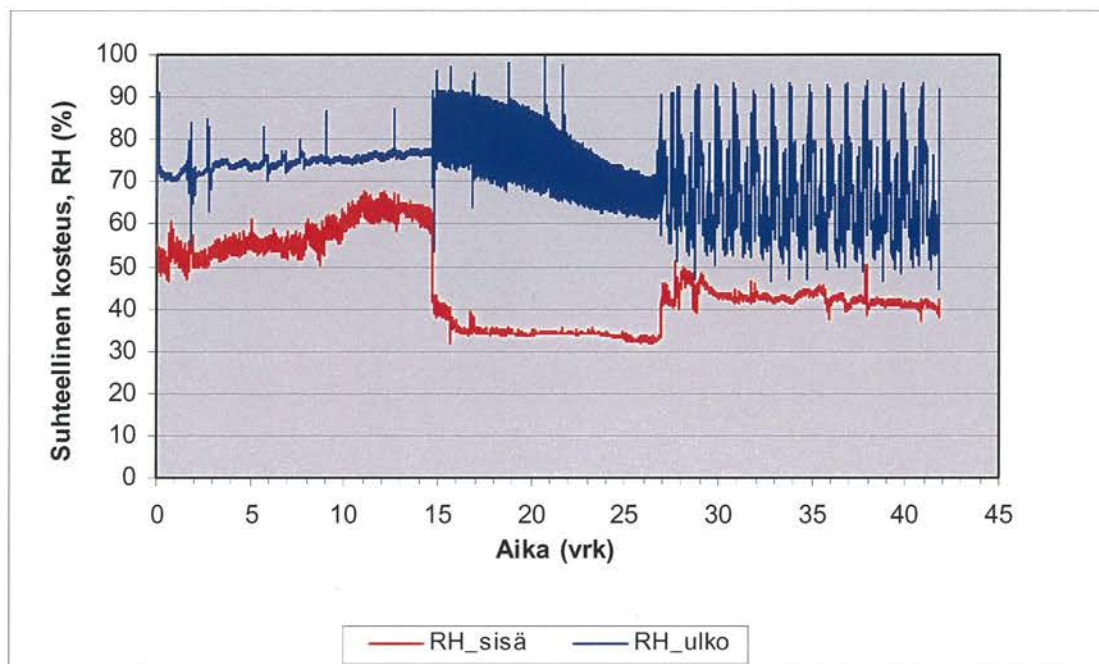
Jakso	ES_Pinta_Y	EU_Pinta_Y	ES_Pinta_A	EU_Pinta_A
Alkutilanne	36,3	59,6	30,5	50,2
Syksy	62,1	96,7	36,1	62,1
Talvi	28,1	99,4	18,5	94,2
Kevät	41,1	77,1	24,1	55,4

Taulukko 6.7 Suhteelliset kosteudet rakenteessa 1B antureittain (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

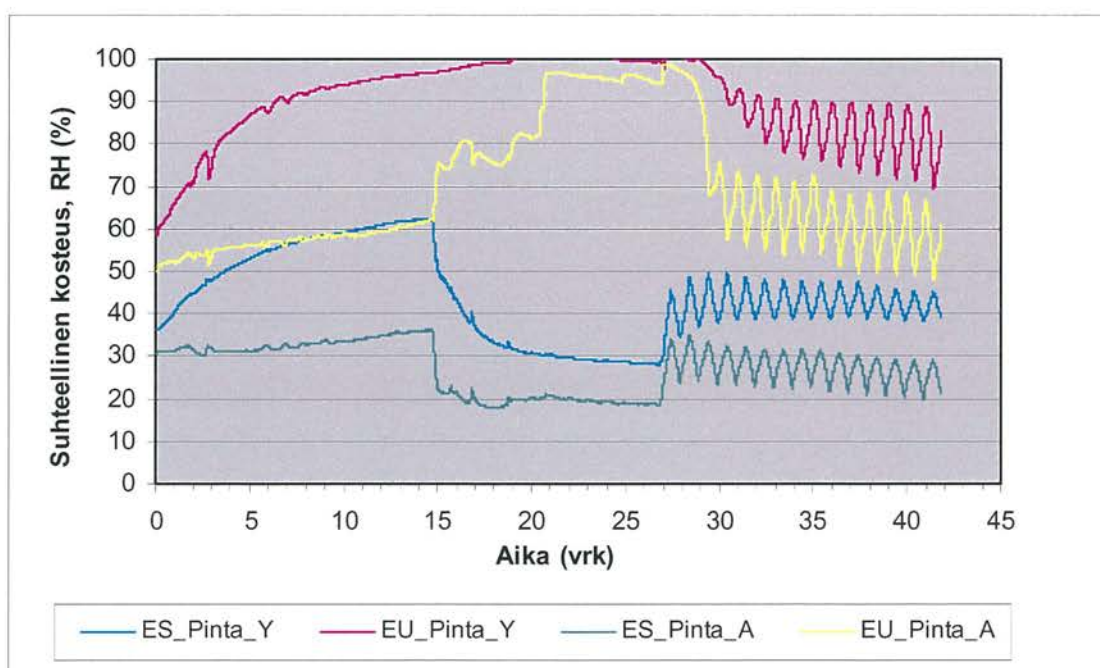
Jakso	ES_Pinta_Y	EU_Pinta_Y	ES_Pinta_A	EU_Pinta_A
Alkutilanne	40,1	40,4	38,2	45,9
Syksy	64,7	89,1	37,4	67,3
Talvi	51,1	84,0	47,6	91,7
Kevät	53,5	97,5	29,8	72,9

Taulukko 6.8 Suhteelliset kosteudet rakenteessa 1C antureittain (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

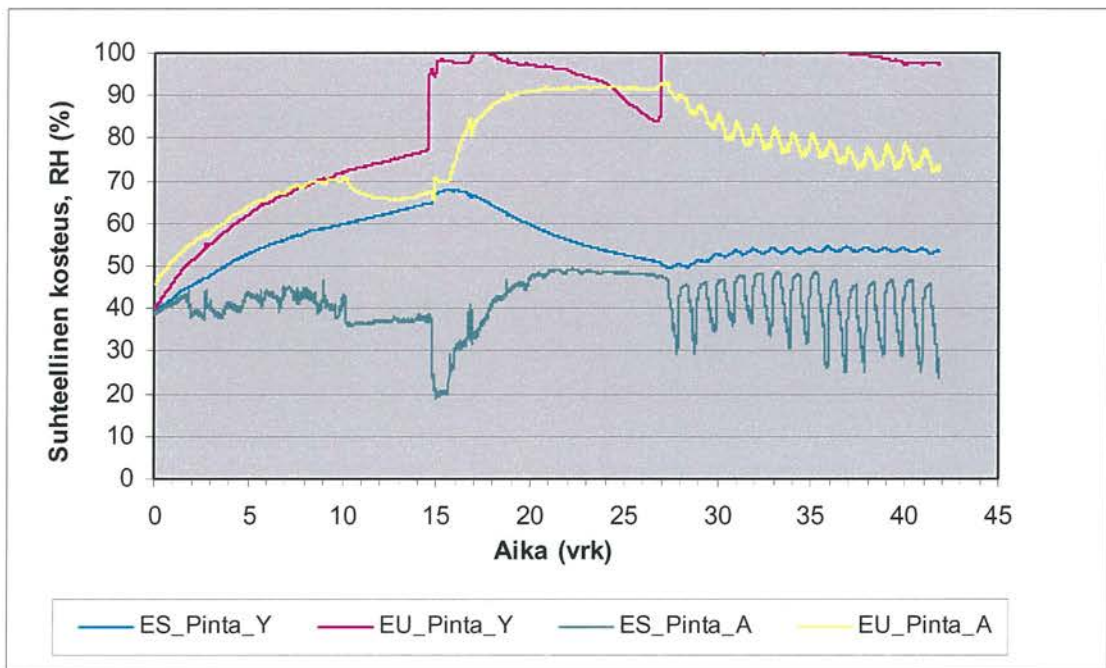
Jakso	ES_Pinta_Y	EU_Pinta_Y	ES_Pinta_A	EU_Pinta_A
Alkutilanne	32,7	65,1	39,0	68,6
Syksy	49,3	73,9	37,9	68,2
Talvi	32,8	85,4	12,0	57,6
Kevät	31,3	64,0	21,4	51,1



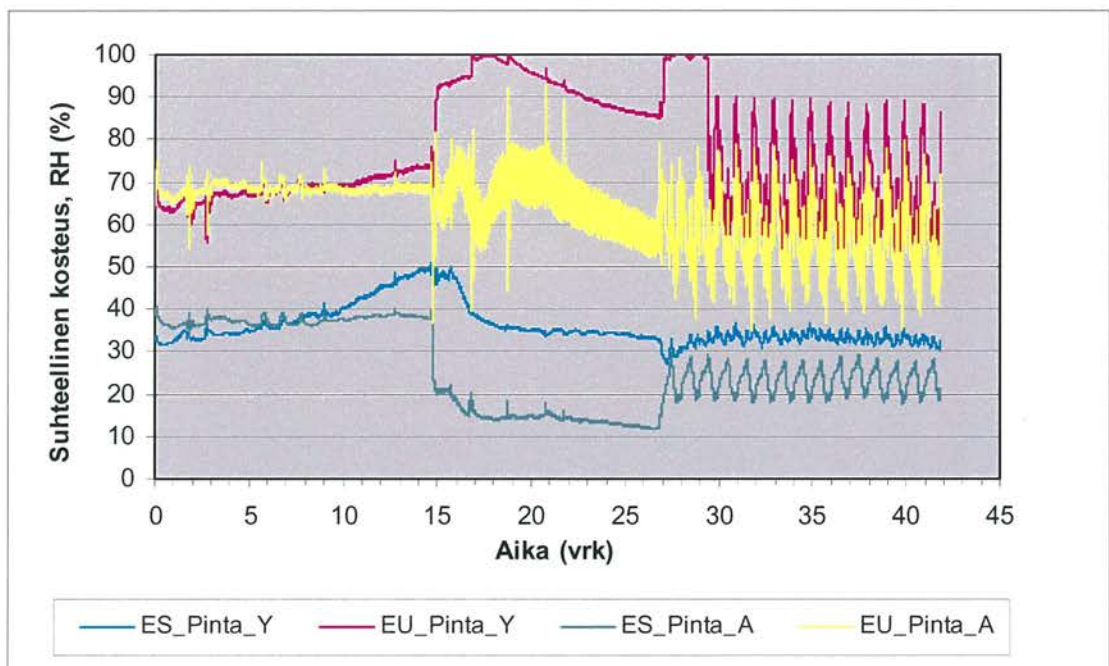
Kuva 6.8 Sisä- ja ulko-olosuhteiden suhteelliset kosteudet koe-erä 1:n aikana.



Kuva 6.9 Seinärakenteen 1A suhteelliset kosteudet kokeen aikana.



Kuva 6.10 Seinärakenteen 1B suhteelliset kosteudet kokeen aikana.



Kuva 6.11 Seinärakenteen 1C suhteelliset kosteudet kokeen aikana.

Rakenteista mitatut huokosilman suhteelliset kosteudet eivät saavuttaneet kaikissa mittauskohdissa stationääritilaa.

Lämmöneristeen sisäpinnasta mitatut huokosilman suhteelliset kosteudet seurasivat melko hyvin sisäilman suhteellista kosteutta jokaisessa rakenteessa ollen kuitenkin lähes poikkeuksetta jonkin verran sisäilman suhteellista kosteutta alhaisempia. Tämä johtuu

siitä, että lämmöneristeen sisäpinnassa lämpötila oli suunnilleen samalla tasolla sisäilman kanssa, mutta sisäpuolella oleva harkkoseinä muodosti sisäilman ja lämmöneristeen välille jonkin verran vesihöyrynvastusta.

Syksyjaksolla huokosilman suhteellinen kosteus alkoi nousta seinärakenteissa 1A ja 1B lämmöneristeen ulkopinnassa erityisesti seinän yläosissa. Syksyjakson loppupuolella suhteellisen kosteuden nousu jonkin verran hidastui, mutta stationääritilaan asti syksyjaksolla ei seinärakenteiden 1A ja 1B osalla päästy. Syksyjakson loppupuolella lämmöneristeen ulkopinnassa suhteelliset kosteudet olivat seinärakenteen 1A yläosassa noin 97 % RH ja seinärakenteen 1B yläosassa noin 98 % RH. Hetkeä ennen syysjakson loppumista seinärakenteen 1B yläosassa lämmöneristeen ulkopinnassa suhteellinen kosteus nousi hyvin jyrkästi ja nopeasti (2-3 minuutin aikana) noin 77 % RH:sta 95-96 % RH:n tasolle. Ainoa selitys ko. ilmiölle on, että sääasituslaitteiston sisäkattopintaan koerakenteen kohdalle tiivistyi kosteutta ja kattopinnasta tippunut vesi kulkeutui rakenteen sisälle mittausanturiin. Julkisivuelementti oli asennettu tiiviisti EPS-eristettä vasten, mutta käytännössä ko. rajakohdasta valuva vesi saattoi päästä rakenteen sisään esimerkiksi mittausanturin johdolle tehtyä uraa pitkin. Seinässä 1C tuuletusraon ala- ja yläosasta (lämmöneristeen ulkopinnasta) mitatut suhteellisen kosteuden arvot seurasivat syksyjaksolla suunnilleen ulkoilman suhteellisen kosteuden arvoja.

Talvijaksolla sekä seinärakenteissa 1A että 1B lämmöneristeen ulkopinnoissa suhteellinen kosteus jatkoi edelleen nousemista syksyjaksosta. Seinärakenteen 1A yläosassa suhteellinen kosteus nousi 100 % RH asti suunnilleen talvijakson puolessa välissä pysyen siellä koko talvijakson. Seinärakenteen 1A alaosassa lämmöneristeen ulkopinnassa suhteellinen kosteus oli talvijakson lopussa noin 98 % RH.

Seinärakenteen 1B yläosassa lämmöneristeen ulkopinnassa suhteellinen kosteus kävi talvijakson alkupuolella 100 % RH:ssa ja lähti sen jälkeen melko pian laskemaan päätyen talvijakson lopussa noin 85 % RH:iin. Tällainen suhteellisen kosteuden lasku voi johtua eristeen ulkopintaan (julkisivuelementin taustapintaan) kondensoituneen veden jääytymisestä, sillä kosteusanturit eivät pysty reagoimaan jäätyneeseen veteen. Lämpötilat ko. kohdassa olivat talvijaksolla nollan tuntumassa tai hieman nollan alapuolella. Sen lisäksi talvijaksolla ulkoilman suhteellisen kosteuden aleneminen on voinut vaikuttaa julkisivuelementin taustapinnan kosteuden alenemiseen. Talvijakson jälkeen ko. kohdassa suhteellinen kosteus nousi välittömästi takaisin 100 % RH:iin, kun jäätynyt kosteus muuttui takaisin vedeksi. Seinärakenteen 1B alaosassa lämmöneristeen suhteellinen kosteus päättyi talvijaksolla noin 92 % RH:iin. Tässä kohdassa kosteuden kondensoitumista ei todennäköisesti tapahtunut.

Seinärakenteen 1C yläosassa tuuletusraossa suhteellinen kosteus kävi talvijaksolla myös 100 % RH:ssa laskien talvijakson loppua kohti noin 85 % RH:iin. Osasyynä suhteellisen kosteuden laskuun oli ulkoilman suhteellisen kosteuden lasku talvijakson loppupuolella.

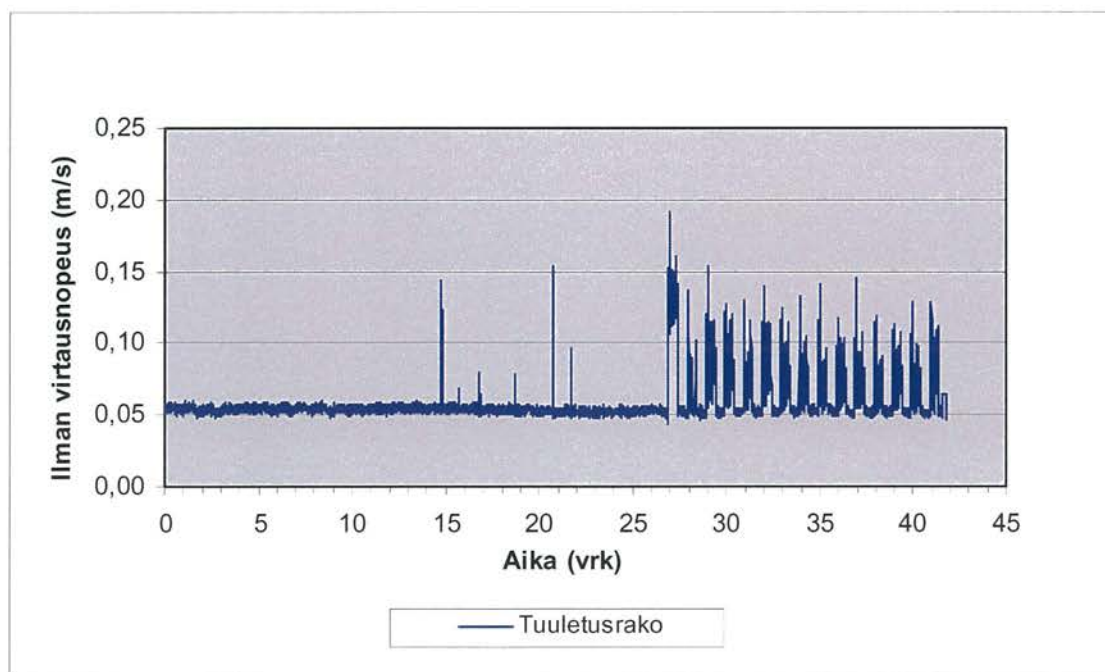
Myös tässä rakenteessa kosteus oli todennäköisesti päässyt jäätymään julkisivuelementin sisäpintaan, koska välittömästi kevätjakson alkupuolella kosteus nousi vielä muutamaksi vuorokaudeksi 100 % RH:iin lähtien sen jälkeen selvästi kuivumaan ja seuraamaan ulkoilman suhteellista kosteutta. Seinän yläosassa suhteellinen kosteus oli tuuletusraossa sekä talvi- että kevätjaksolla noin 15-20 % RH korkeampi kuin alaosassa.

Kevätjaksolla jokaisen rakenteen lämmöneristeen ulkopinnassa suhteellinen kosteus lähti laskemaan lukuun ottamatta seinärakenteen 1B yläosaa, jossa suhteellinen kosteus laski 100 % RH:sta alaspäin hitaasti vasta aivan kevätjakson loppupuolella päätyen noin 97 % RH:iin. Ko. mittauskohta ei todennäköisesti saavuttanut kuitenkaan statiönääritilaa. Muissa rakenteissa lämmöneristeen ulkopinnan suhteellinen kosteus seurasi kokeen lopussa syklisesti ulkoilman suhteellisen kosteuden vaihteluita.

Mineraalivillaeristeisessä seinärakenteessa 1A huokosilman suhteellinen kosteus seinän yläosassa oli korkeampi kuin EPS-eristeisessä seinärakenteessa 1B koko kokeen ajan.

6.2.4 Ilmavirtausmittaus

Seinärakenteen 1C tuuletusrakoon seinän keskiosaan sijoitetulla ilmavirtausmittarilla mitattiin tuuletusraossa kulkevan ilmavirran nopeutta. Tuuletusraon leveys oli noin 10 mm. Tulokset ilmavirtausmittauksesta on esitetty kuvassa 6.12.



Kuva 6.12

Tulokset tuuletusraon ilmavirtausmittauksesta seinärakenteessa 1C.

Tuloksista nähdään, että tuuletusraon ilman virtausnopeus oli alle 0,05 m/s käytännössä koko syksy- ja talvijakson ajan. Kevätjaksolla ilmavirran nopeus muuttui 12 h:n jaksoissa siten, että ilmavirran nopeus oli 12 h yhtäjaksoisesti noin 0,06-0,12 m/s ja seuraavat 12 h jälleen kynnysarvossa syys- ja talvijaksojen tapaan. Tämä ilmiö johtui pelkästään koelaitteiston ominaisuuksista, koska keväthajalla syklisessä lämpötilan nousuvaiheessa (kesto 12 h) rakenteen pinnan lämmittämiseen käytettiin säteilylämmittimiä, joita ei koko kokeen aikana muuten käytetty. Säteilylämmittimien käytön aikana ei säärasituslaitteistossa käytetty koerakenteen edessä olevan ison jäähdytyskennon puhaltimia lainkaan, jolloin rakenteen pintaan vaikuttava ilmavirran suunta muuttui. Säteilylämmittimen aikana säärasituslaitteistossa oli käytössä ulkokammion takaseinän yläosassa olevat pienemmän jäähdytyskennon puhaltimet, jotka puhalsivat ilman suoraan kattopintaa pitkin koerakenteen yläosaan (tässä tapauksessa myös seinärakenteen 1C tuuletusrakoon). Siten voidaan todeta, että myös keväthajalla tuuletusraossa olevan ilmavirran nopeus olisi samoilla koejärjestelyillä (säädöillä) kuin syksy- ja talvijaksolla ollut koko ajan kynnysarvossa. Kuvan 6.12 kuvaajaan tulee näin ollen suhtautua hyvin kriittisesti.

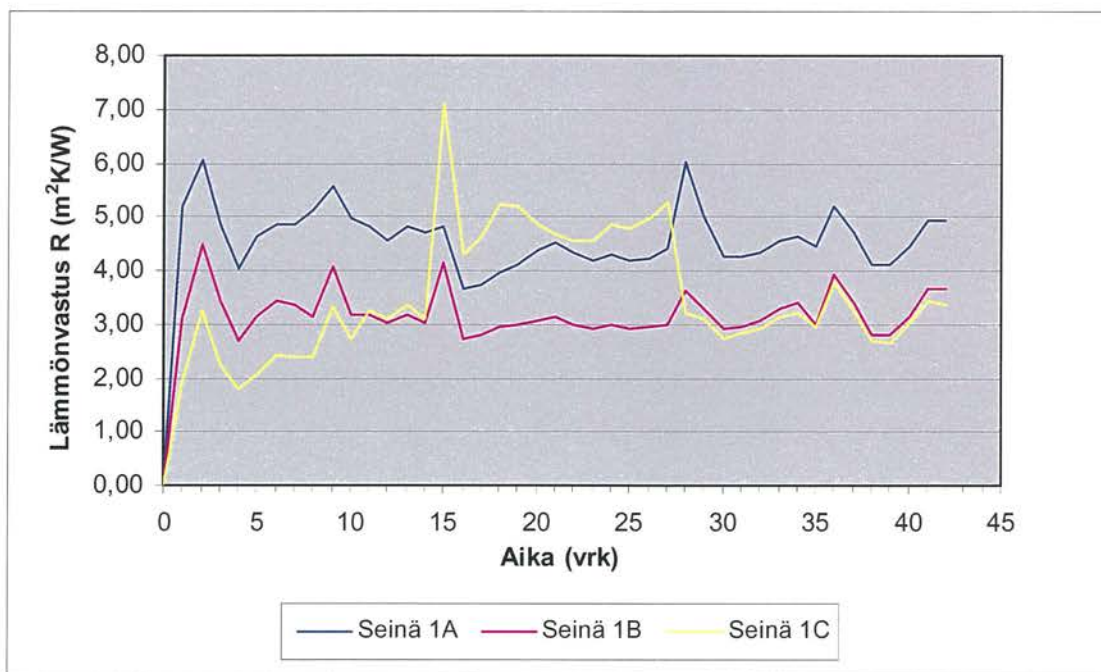
6.2.5 Lämpövirtalevy mittaukset

Koe-erän 1 seinärakenteiden lämpövirtalevy mittauksen tulokset on esitetty kuvassa 6.13. Kuvassa 6.14 on esitetty seinärakenteiden lasketut lämmönvastusarvot (R-arvot).



Kuva 6.13

Lämpövirran tiheydet koerakenteiden läpi koe-erässä 1.



Kuva 6.14 Seinärakenteiden lasketut lämmönvastusarvot koe-erässä 1.

Syksyjaksolla seinärakenteen 1C läpi virtasi lämpöä enemmän kuin muissa seinärakenteissa, koska tuuletusraoissa seinässä julkisivuelementin eristyskyky oli ei-tuuletusraoissa heikompi. Myös talvijaksolla asian tulisi olla vastaavalla tavalla. Mittaustulosten perusteella kuitenkin seinässä 1C lämpövirta seinän läpi oli selvästi pienintä talvijaksolla. Seinärakenteessa 1C lämmönvastusarvo myös nousi talvijaksolla muuta suuremmaksi, mikä kertoo rakenteen lämmöneristyskyvyn parantumisesta talvijaksolla. Mahdollinen selitys asialle on se, että ilman virtaus tuuletusraossa oli erityisesti talvijaksolla niin pientä, että tuuletusvälin ilma (seisova ilma) toimi lisälämmöneristeenä julkisivuelementin eristyksen lisäksi.

Seinärakenteissa 1A ja 1B lämmönvastusarvot pysyivät melko vakiona koko kokeen ajan. Seinärakenteen 1A lämmönvastusarvo oli suurin syksy- ja kevätjaksoilla. Talvijaksolla sisäkammiossa ollut lämmitin puhalsi lämmintä ilmaa eniten seinärakennetta 1A kohti, jolloin sisäpinnan lämpötila nousi. Tällöin rakenteen yli oleva lämpötilaero oli suurempi kuin muissa seinärakenteissa, jolloin myös lämpövirta seinärakenteen 1A läpi kasvoi muista rakenteista enemmän. Tämän takia talvijakso ei kuvaa normaalia tilannetta, jos rakenteita verrataan keskenään. Seinärakenteessa 1A lämmöneristeenä käytetyn mineraalivillan lämmönjohtavuus oli todennäköisesti pienempi kuin seinärakenteessa 1B käytetyn EPS-eristeen.

6.3 Koe-erä 2 (seinärakenteet 2A-2C)

6.3.1 Rakenteiden lämpötilat

Jokaisen jakson lopusta lasketut 6 tunnin keskiarvot on esitetty taulukoissa 6.9-6.12. Kuvissa 6.15-6.18 on esitetty vastaavista antureista mitatut lämpötilat koko kokeen ajalta.

Taulukoissa 6.9-6.12 ja kuvissa 6.15-6.18 esitetyt lyhenteet tarkoittavat seuraavia mittauskohtia (tarkemmat anturien paikat on merkitty liitteessä 2 oleviin kuviin):

SEINÄ 2A:

S_Pinta_Y	= sisäpinnan pintalämpötila seinän yläosassa
E50_S_Pinta_Y	= 50 mm:n EPS-eristeen sisäpinta seinän yläosassa
E50_U_Pinta_Y	= 50 mm:n EPS-eristeen ulkopinta seinän yläosassa
E25_U_Pinta_Y	= 25 mm:n EPS-irtoeristeen ulkopinta seinän yläosassa
JS_S_Pinta_Y	= julkisivuelementin sisäpinnan pintalämpötila seinän yläosassa (elementtiin liimatun 25 mm:n eristeen sisäpinta)
JS_U_Pinta_Y	= julkisivuelementin ulkopinnan pintalämpötila seinän yläosassa
S_Pinta_A	= sisäpinnan pintalämpötila seinän alaosassa
E50_S_Pinta_A	= 50 mm:n EPS-eristeen sisäpinta seinän alaosassa
E25_U_Pinta_A	= 25 mm:n EPS-irtoeristeen ulkopinta seinän alaosassa
JS_S_Pinta_A	= julkisivuelementin sisäpinnan pintalämpötila seinän alaosassa (elementtiin liimatun 25 mm:n eristeen sisäpinta)
JS_U_Pinta_A	= julkisivuelementin ulkopinnan pintalämpötila seinän alaosassa

SEINÄ 2B:

S_Pinta_Y	= sisäpinnan pintalämpötila seinän yläosassa
E75_S_Pinta_Y	= 75 mm:n EPS-eristeen sisäpinta seinän yläosassa
E75K_U_Pinta_Y	= 75 mm:n EPS-eristeen ulkopinta (elementtiin liimatun 25mm:n paksuisen uritetun EPS-eristeen urittamaton alue eli ”kannas”) seinän yläosassa
TK_Y	= tuuletuskanava seinän yläosassa
TK_U_Pinta_Y	= tuuletuskanavan ulkopinnan pintalämpötila seinän yläosassa
JS_U_Pinta_Y	= julkisivuelementin ulkopinnan pintalämpötila seinän yläosassa
S_Pinta_A	= sisäpinnan pintalämpötila seinän alaosassa
E75_S_Pinta_A	= 75 mm:n EPS-eristeen sisäpinta seinän alaosassa
TK_A	= tuuletuskanava seinän alaosassa
TK_U_Pinta_A	= tuuletuskanavan ulkopinnan pintalämpötila seinän alaosassa
JS_U_Pinta_A	= julkisivuelementin ulkopinnan pintalämpötila seinän alaosassa

SEINÄ 2C:

S_Pinta_Y	= sisäpinnan pintalämpötila seinän yläosassa
E75_S_Pinta_Y	= 75 mm:n kivivillan sisäpinta seinän yläosassa
E75_U_Pinta_Y	= 75 mm:n kivivillan ulkopinta seinän yläosassa
TR_Y	= tuuletusrako seinän yläosassa
JS_S_Pinta_Y	= julkisivuelementin sisäpinnan pintalämpötila seinän yläosassa
JS_U_Pinta_Y	= julkisivuelementin ulkopinnan pintalämpötila seinän yläosassa
S_Pinta_A	= sisäpinnan pintalämpötila seinän alaosassa
E75_S_Pinta_A	= 75 mm:n kivivillan sisäpinta seinän alaosassa
TR_A	= tuuletusrako seinän alaosassa
JS_S_Pinta_A	= julkisivuelementin sisäpinnan pintalämpötila seinän alaosassa
JS_U_Pinta_A	= julkisivuelementin ulkopinnan pintalämpötila seinän alaosassa

Taulukoissa olevat alkutilanteen lämpötilat ovat alle 20 °C, koska syysolosuhdekoe käynnistettiin säärasituslaitteistossa ennen mittauksen käynnistystä.

Taulukko 6.9 Lämpötilat sisällä ja ulkona (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

Jakso	T_Sisä	T_Ulko
Alkutilanne	17,5	8,4
Syksy	19,5	7,7
Talvi	19,8	-9,3
Kevät	20,6	-3,0

Taulukko 6.10 Lämpötilat rakenteessa 2A antureittain (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

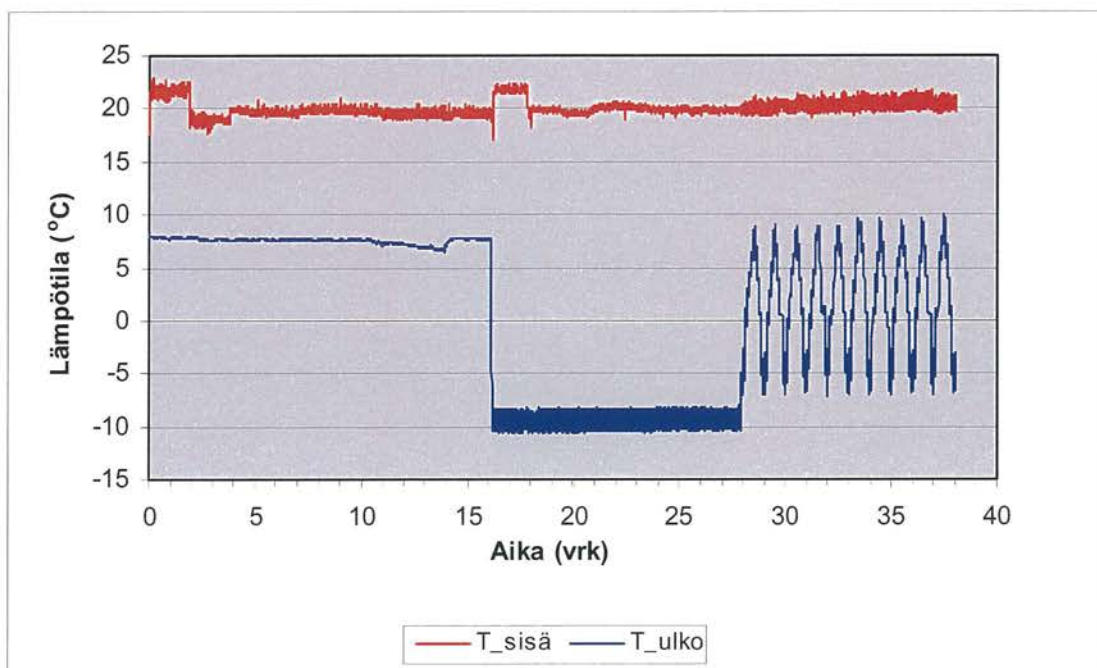
Jakso	S_Pinta_Y	E50_S_Pinta_Y	E50_U_Pinta_Y	E25_U_Pinta_Y	JS_S_Pinta_Y	JS_U_Pinta_Y	S_Pinta_A	E50_S_Pinta_A	E25_U_Pinta_A	JS_S_Pinta_A	JS_U_Pinta_A
Alkutilanne	18,1	17,8	15,6	13,4	12,9	7,6	18,7	18,8	14,3	13,0	7,8
Syksy	19,1	17,6	15,5	13,4	12,7	7,3	18,4	17,1	13,3	12,3	7,0
Talvi	17,1	13,6	7,5	2,7	2,7	-9,5	16,5	13,0	3,0	2,0	-9,8
Kevät	18,8	16,6	12,1	8,0	7,8	-3,0	18,3	16,1	8,4	7,3	-3,3

Taulukko 6.11 Lämpötilat rakenteessa 2B antureittain (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

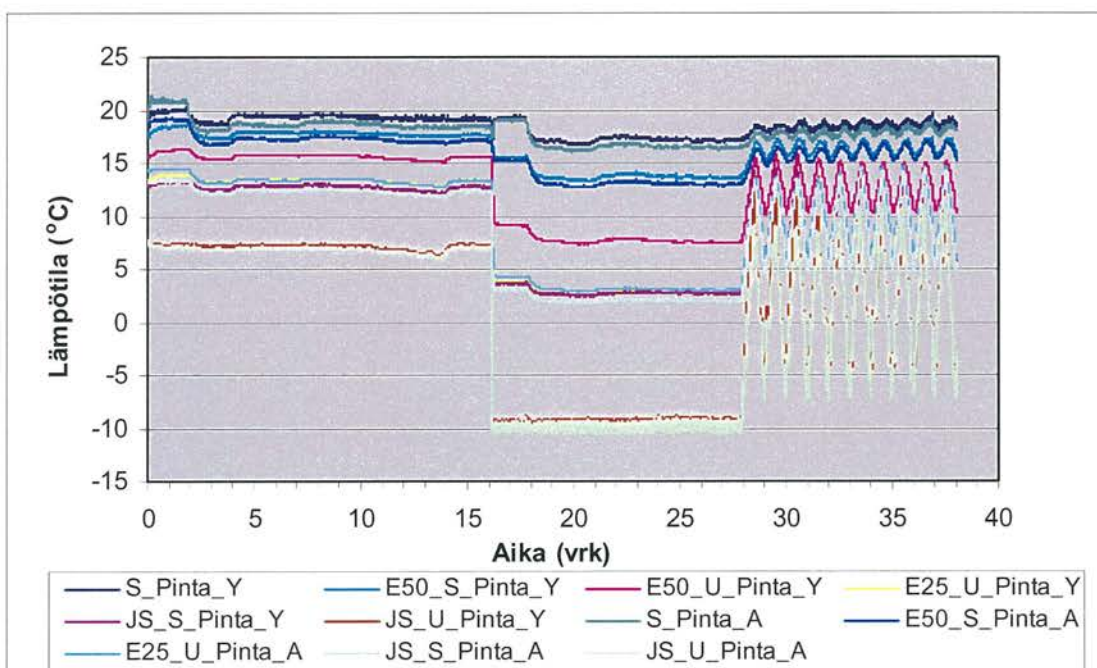
Jakso	S_Pinta_Y	E75_S_Pinta_Y	E75K_U_Pinta_Y	TK_Y	TK_U_Pinta_Y	JS_U_Pinta_Y	S_Pinta_A	E75_S_Pinta_A	TK_A	TK_U_Pinta_A	JS_U_Pinta_A
Alkutilanne	18,5	17,5	13,3	11,5	10,4	7,5	18,9	19,2	9,8	9,2	7,4
Syksy	18,2	16,2	12,6	10,5	9,6	6,8	18,1	17,1	9,0	8,1	6,8
Talvi	18,2	14,3	3,7	-4,2	-1,3	-10,2	17,3	13,0	-7,8	-8,4	-10,2
Kevät	19,0	16,1	7,4	1,0	0,9	-3,9	18,8	16,0	-1,5	-2,2	-3,7

Taulukko 6.12 Lämpötilat rakenteessa 2C antureittain (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

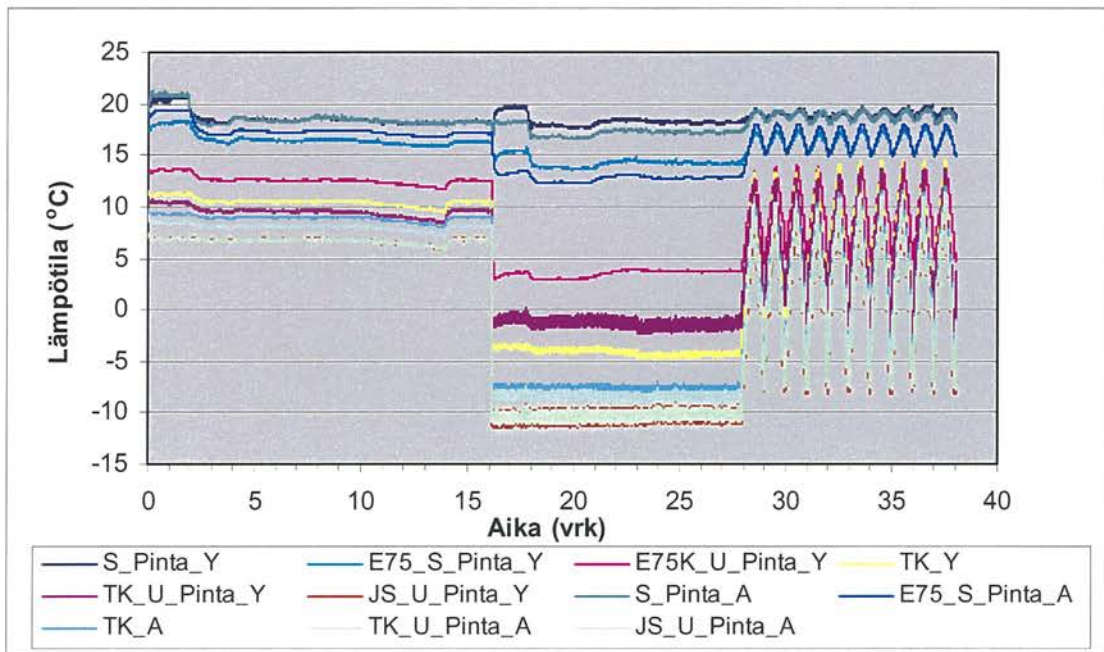
Jakso	S_Pinta_Y	E75_S_Pinta_Y	E75_U_Pinta_Y	TR_Y	JS_S_Pinta_Y	JS_U_Pinta_Y	S_Pinta_A	E75_S_Pinta_A	TR_A	JS_S_Pinta_A	JS_U_Pinta_A
Alkutilanne	18,7	18,7	12,3	9,2	9,0	7,5	19,2	19,0	10,8	9,7	7,4
Syksy	17,4	16,4	11,2	8,5	8,2	6,8	18,1	16,8	10,0	9,0	6,8
Talvi	18,3	15,1	0,5	-8,2	-6,7	-10,1	18,4	15,2	-4,2	-5,3	-9,8
Kevät	19,1	17,3	7,5	-0,3	1,4	-3,6	19,2	17,3	3,7	2,7	-3,1



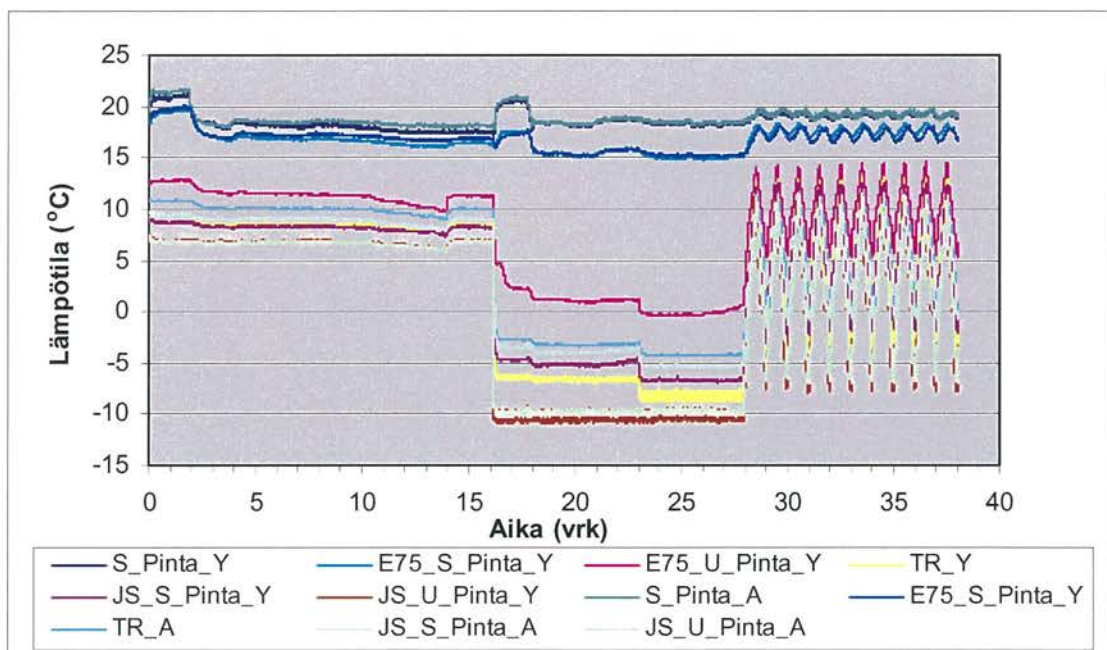
Kuva 6.15 Sisä- ja ulkolämpötilat koe-erä 2:n aikana.



Kuva 6.16 Seinärakenteen 2A lämpötilat kokeen aikana.



Kuva 6.17 Seinärakenteen 2B lämpötilat kokeen aikana.



Kuva 6.18 Seinärakenteen 2C lämpötilat kokeen aikana.

Lämpötilojen osalta jokaisessa rakenteessa ja kaikissa koeolosuhteissa saavutettiin stationääritila.

Jokaisesta rakenteesta mitatut lopulliset ulkopintojen pintalämpötilat olivat syksyjaksolla noin 0-0,7 °C, talvijaksolla 0,7-0,9 °C ja kevätjaksolla 0,1-0,9 °C alhaisempia kuin ulkoilman lämpötila.

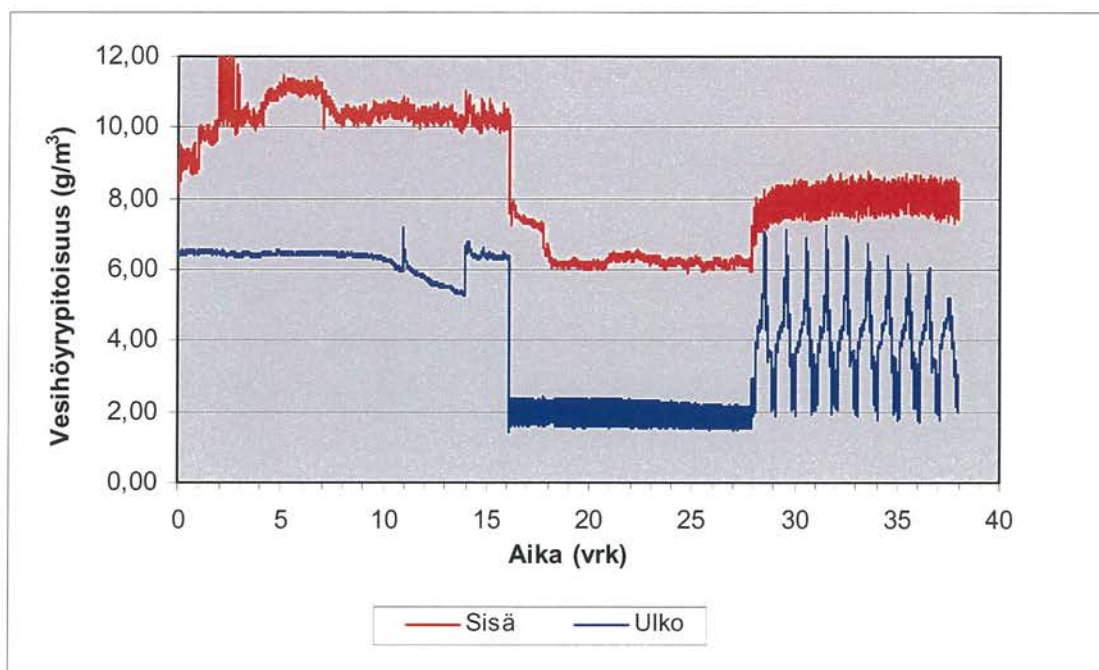
Seinäarakenteen 2B tuuletuskanavan alaosassa lämpötilat olivat alhaisempia kuin tuuletuskanavan yläosassa. Selvin ero syntyi talvijaksolla, jolloin ulkoilman lämpötila oli -9,3 °C, tuuletuskanavan alaosassa -7,8 °C ja tuuletuskanavan yläosassa -4,2 °C. Syksyllä tuuletuskanavan alaosassa lämpötila oli noin 1,5 °C ja yläosassa noin 3 °C ulkoilman lämpötilaa korkeampi. Kevätjaksolla tuuletuskanavan alaosassa lämpötila oli noin 1,5 °C ja yläosassa noin 4 °C korkeampi kuin ulkoilman lämpötila. Seinän alaosassa tuuletuskanavan lämpötila oli alhaisempi siksi, että säärasisustuslaitteiston jäähdytyskennon puhaltimet puhalsivat ilmavirran enemmän kohti seinän keski- ja alaosaa.

Päinvastoin kuin seinäarakenteessa 2B, seinäarakenteen 2C tuuletusraossa seinän alaosassa oli korkeammat lämpötilat kuin seinän yläosassa tuuletusraossa. Erityisesti talvi- ja kevätjaksolla lämpötilaero oli suuri (talvella yläosassa -8,2 °C ja alaosassa -4,2 °C, keväällä yläosassa -0,3 °C ja alaosassa 3,7 °C). Tältä osin mittaustulokset ovat epäloogisia sillä, jos ilmavirtaus tapahtui tuuletusraossa ylhäältä alaspäin, lämpötilakentän pitäisi olla toisin päin (kuva 6.18). Asiaa on tarkasteltu lisää kohdassa 6.3.4.

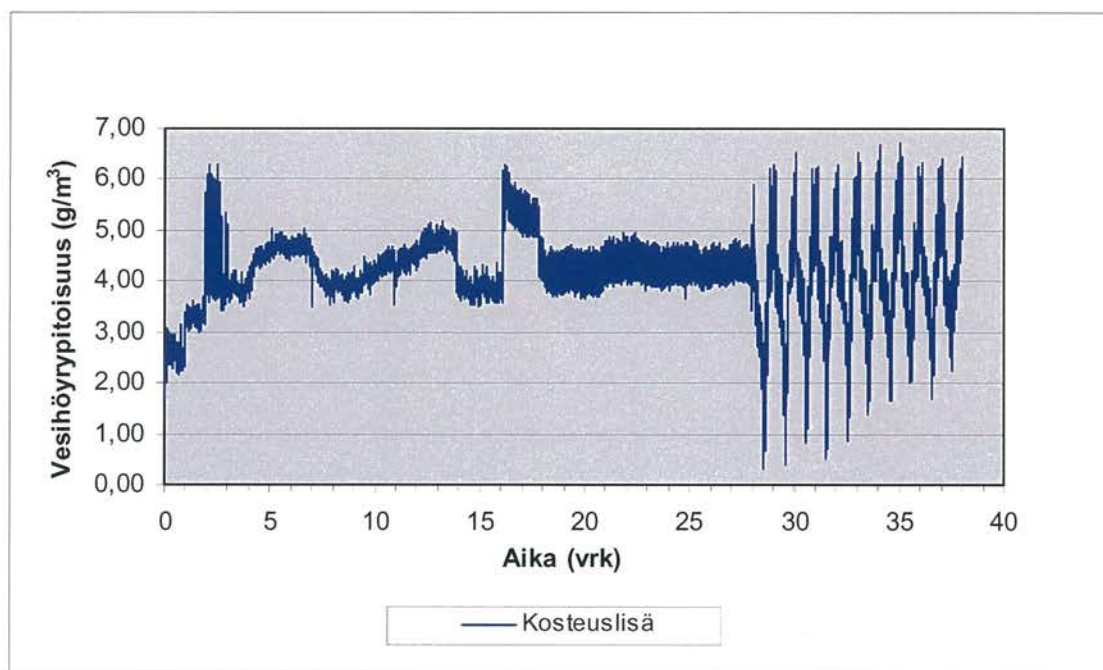
Seinäarakenteen 2A lämpötilat olivat loogisia. Seinän ylä- ja alaosan lämpötilat olivat keskenään samansuuruisia.

6.3.2 Vesihöyrypitoisuudet ja kosteuslisä

Koe-erän 2 sisä- ja ulkoilman kokeen aikaiset vesihöyrypitoisuudet on esitetty kuvassa 6.19 ja kosteuslisä kuvassa 6.20.



Kuva 6.19 Sisä- ja ulkoilman vesihöyrypitoisuudet koe-erä 2:n aikana.



Kuva 6.20 Kosteuslisä koe-erä 2:n aikana.

Koe-erä 2:n aikana todellinen kosteuslisä vaihteli syksy- ja talvijaksolla pääsääntöisesti $3,5\text{--}5\text{ g/m}^3$ välillä ja kevätjaksolla $1\text{--}6\text{ g/m}^3$ välillä. Koko kokeen aikana 5 minuutin välein tallennetusta mittausdatasta laskettuna kosteuslisän keskiarvo oli $4,2\text{ g/m}^3$.

6.3.3 Suhteelliset kosteudet rakenteissa

Jokaisen jakson lopusta lasketut 6 tunnin keskiarvot on esitetty taulukoissa 6.13-6.16. Kuvissa 6.21-6.24 on esitetty vastaavista antureista mitatut suhteelliset kosteudet koko kokeen ajalta.

Taulukoissa 6.13-6.16 ja kuvissa 6.21-6.24 esitetyt lyhenteet tarkoittavat seuraavia rakenteen suhteellisen kosteuden mittaushohtia (tarkemmat anturien paikat on merkitty liitteessä 2 oleviin kuviin):

SEINÄ 2A:

E50_S_Pinta_Y	= 50 mm:n EPS-eristeen sisäpinta seinän yläosassa
E50_U_Pinta_Y	= 50 mm:n EPS-eristeen ulkopinta seinän yläosassa
E25_U_Pinta_Y	= 25 mm:n EPS-irtoeristeen ulkopinta seinän yläosassa (elementtiin liimatun 25 mm:n eristeen sisäpinta)
E50_S_Pinta_A	= 50 mm:n EPS-eristeen sisäpinta seinän alaosaassa
E25_U_Pinta_A	= 25 mm:n EPS-irtoeristeen ulkopinta seinän alaosaassa

SEINÄ 2B:

E75_S_Pinta_Y	= 75 mm:n EPS-eristeen sisäpinta seinän yläosassa
E75K_U_Pinta_Y	= 75 mm:n EPS-eristeen ulkopinta (elementtiin liimatun 25 mm:n paksuisen uritetun EPS-eristeen urittamaton alue eli ”kannas”) seinän yläosassa
TK_Y	= tuuletuskanava seinän yläosassa
E75_S_Pinta_A	= 75 mm:n EPS-eristeen sisäpinta seinän alaosaassa
TK_A	= tuuletuskanava seinän alaosaassa

SEINÄ 2C:

E75_S_Pinta_Y	= 75 mm:n kivivillan sisäpinta seinän yläosassa
E75_U_Pinta_Y	= 75 mm:n kivivillan ulkopinta seinän yläosassa
TR_Y	= tuuletusrako seinän yläosassa
E75_S_Pinta_A	= 75 mm:n kivivillan sisäpinta seinän alaosaassa
TR_A	= tuuletusrako seinän alaosaassa

Taulukko 6.13 Suhteelliset kosteudet sisällä ja ulkona (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

Jakso	RH_Sisä	RH_Ulko
Alkutilanne	56,1	75,4
Syksy	61,2	78,8
Talvi	36,2	75,9
Kevät	44,4	72,1

Taulukko 6.14 Suhteelliset kosteudet rakenteessa 2A antureittain (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

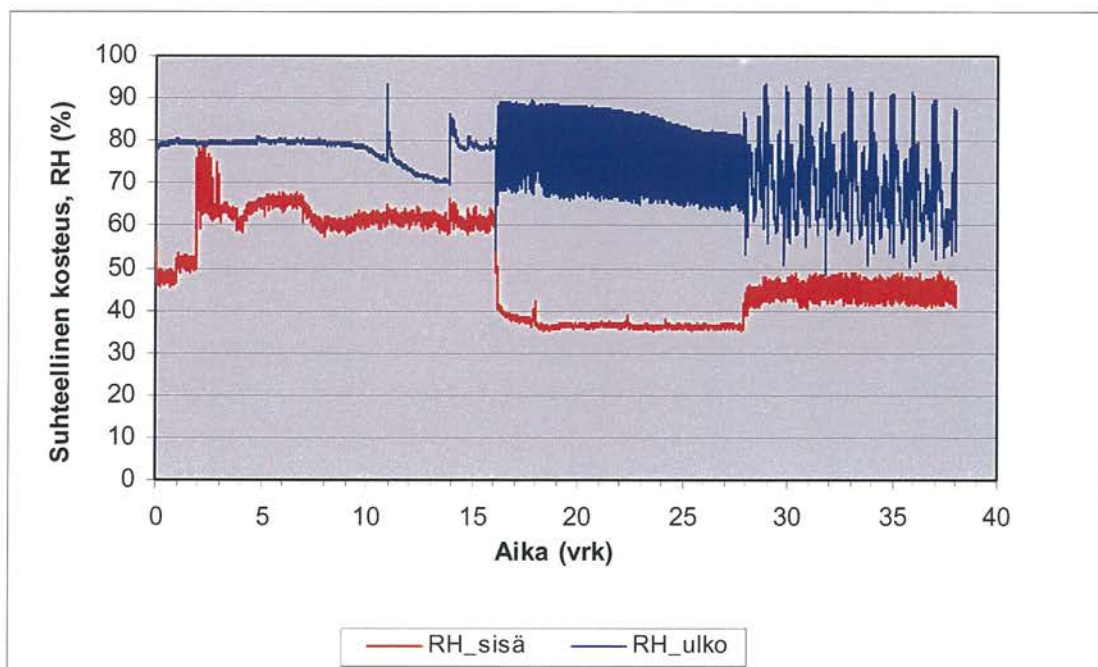
Jakso	E50_S_Pinta_Y	E50_U_Pinta_Y	E25_U_Pinta_Y	E50_S_Pinta_A	E25_U_Pinta_A
Alkutilanne	39,9	47,1	51,1	38,6	49,3
Syksy	54,0	63,5	63,3	44,9	57,3
Talvi	53,2	77,3	84,8	45,9	70,5
Kevät	52,2	66,2	69,8	45,1	60,2

Taulukko 6.15 Suhteelliset kosteudet rakenteessa 2B antureittain (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

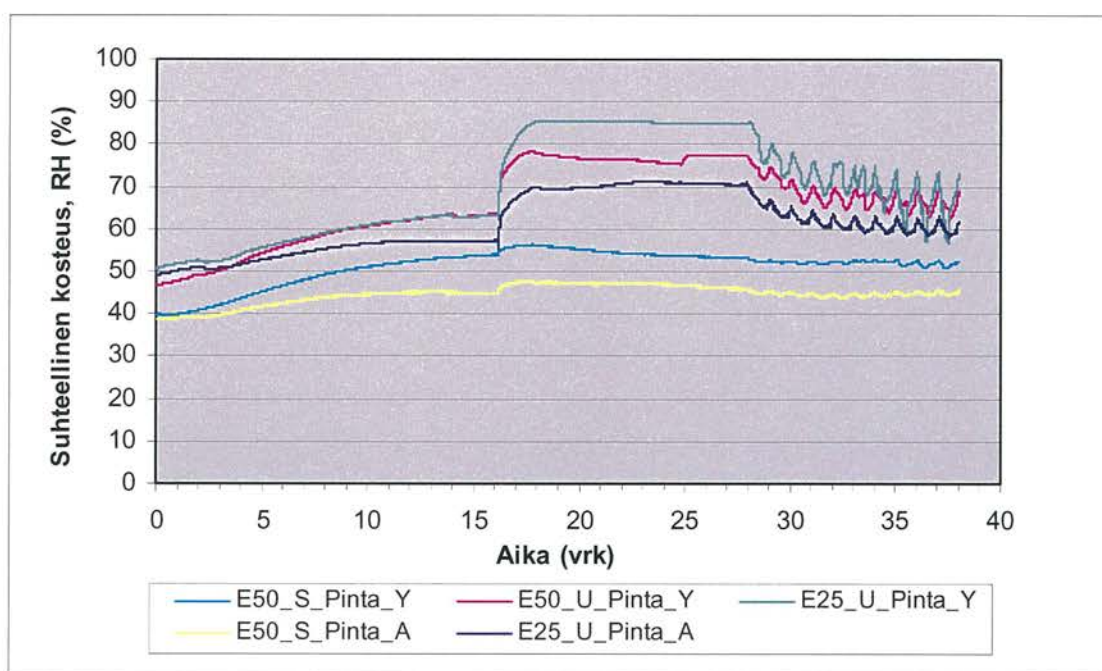
Jakso	E75_S_Pinta_Y	E75K_U_Pinta_Y	TK_Y	E75_S_Pinta_A	TK_A
Alkutilanne	35,9	52,7	60,8	33,7	66,2
Syksy	40,9	55,7	64,4	40,8	69,9
Talvi	48,8	83,1	53,0	13,4	65,1
Kevät	37,8	35,5	52,3	20,2	60,9

Taulukko 6.16 Suhteelliset kosteudet rakenteessa 2C antureittain (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

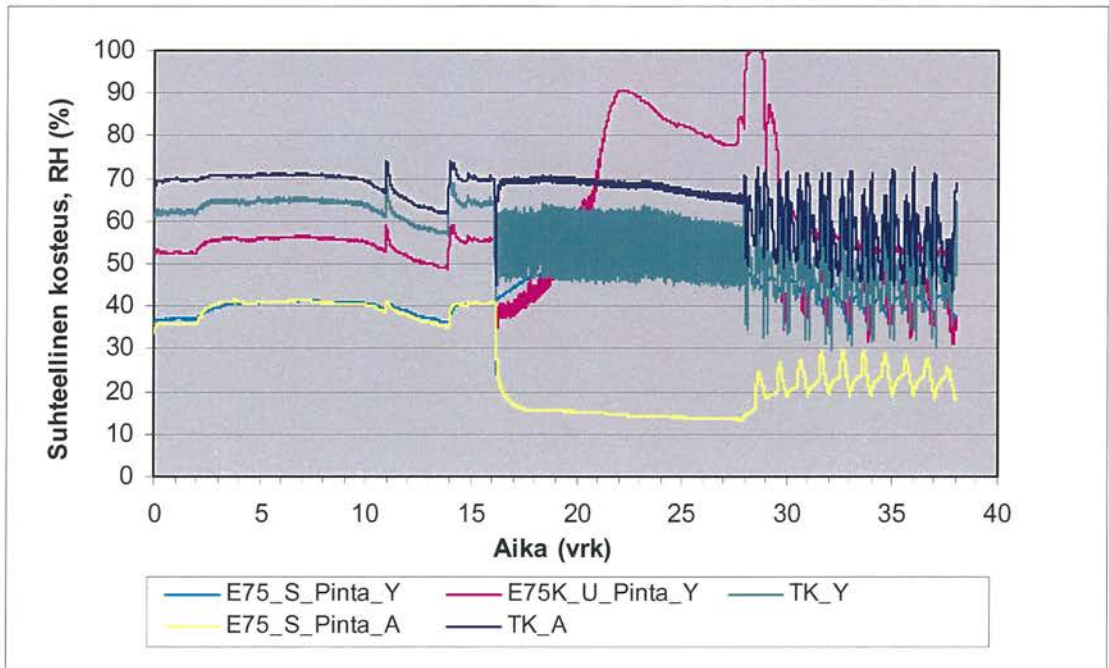
Jakso	E75_S_Pinta_Y	E75_U_Pinta_Y	TR_Y	E75_S_Pinta_A	TR_A
Alkutilanne	33,9	57,8	71,6	32,6	62,9
Syksy	41,1	62,6	75,2	40,5	67,2
Talvi	19,1	51,1	72,5	16,1	57,5
Kevät	26,9	51,6	64,1	23,7	52,2



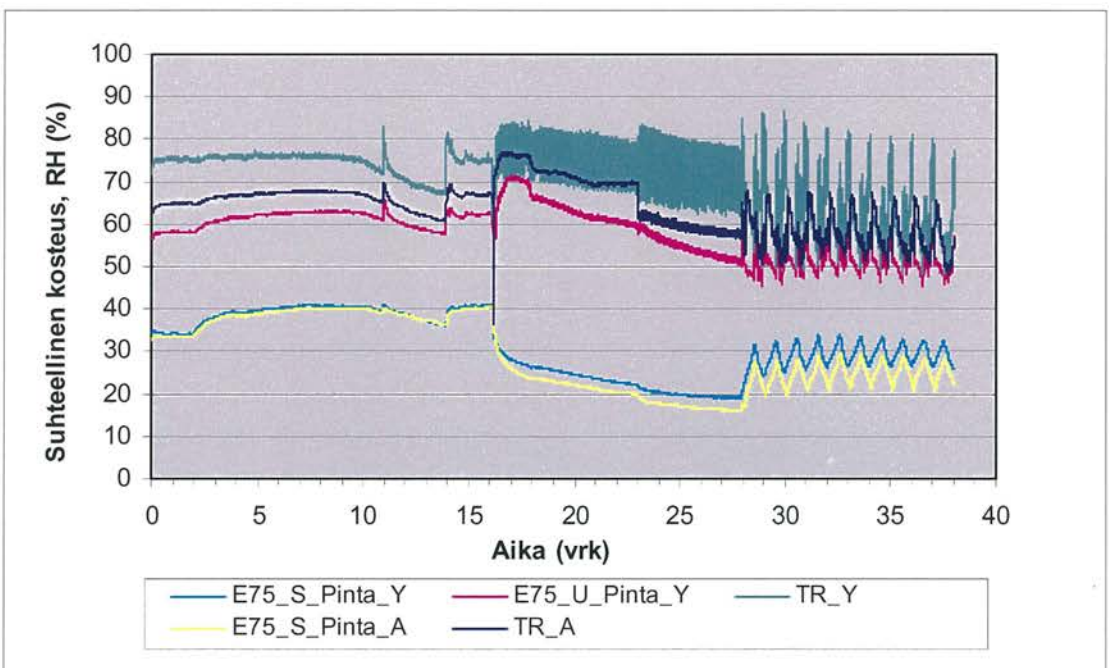
Kuva 6.21 Sisä- ja ulko-olosuhteiden suhteelliset kosteudet koe-erä 2:n aikana.



Kuva 6.22 Seinärakenteen 2A suhteelliset kosteudet kokeen aikana.



Kuva 6.23 Seinärakenteen 2B suhteelliset kosteudet kokeen aikana.



Kuva 6.24 Seinärakenteen 2C suhteelliset kosteudet kokeen aikana.

Rakenteista mitatut huokosilman suhteelliset kosteudet saavuttivat kokeen aikana stationääritilan käytännössä kaikissa rakenteissa ja olosuhteissa.

Ulkoilman suhteellinen kosteus laski hieman tavoitearvosta syksyjakson loppua kohti mentäessä. Syksyjaksolla jokaisessa seinässä rakenteiden suhteelliset kosteudet nousivat joko hyvin maltillisesti tai nousua ei juurikaan lähtötilanteesta enää tapahtunut.

Jokaisessa rakenteessa jäätettiin mitatuissa kohdissa 80 % RH:n alle. Seinärakenteen 2B tuuletuskanavassa ja seinän 2C tuuletusraossa suhteelliset kosteudet olivat noin 5-15 % RH alhaisempia kuin ulkoilmassa.

Talvijaksolla seinärakenteen 2A lämmöneristeiden ulkopinnoissa suhteelliset kosteudet nousivat noin 15-20 % RH verrattuna syksyjakson loppuosaan. Suhteellisen kosteuden nousu talvijakson alussa ja sen tasoittuminen talvijakson alkupuolella tapahtui seinärakenteessa 2A nopeasti. Talvijaksolla seinärakenteen 2A suhteellinen kosteus nousi korkeimmillaan (koko jakson ajan) 25 mm:n irtoeristeen ulkopinnassa noin 85 % RH:iin, jota ei voida talvijaksolla pitää korkeana arvona. Kevätjaksolla seinärakenne 2A lähti kuivumaan tasaisesti.

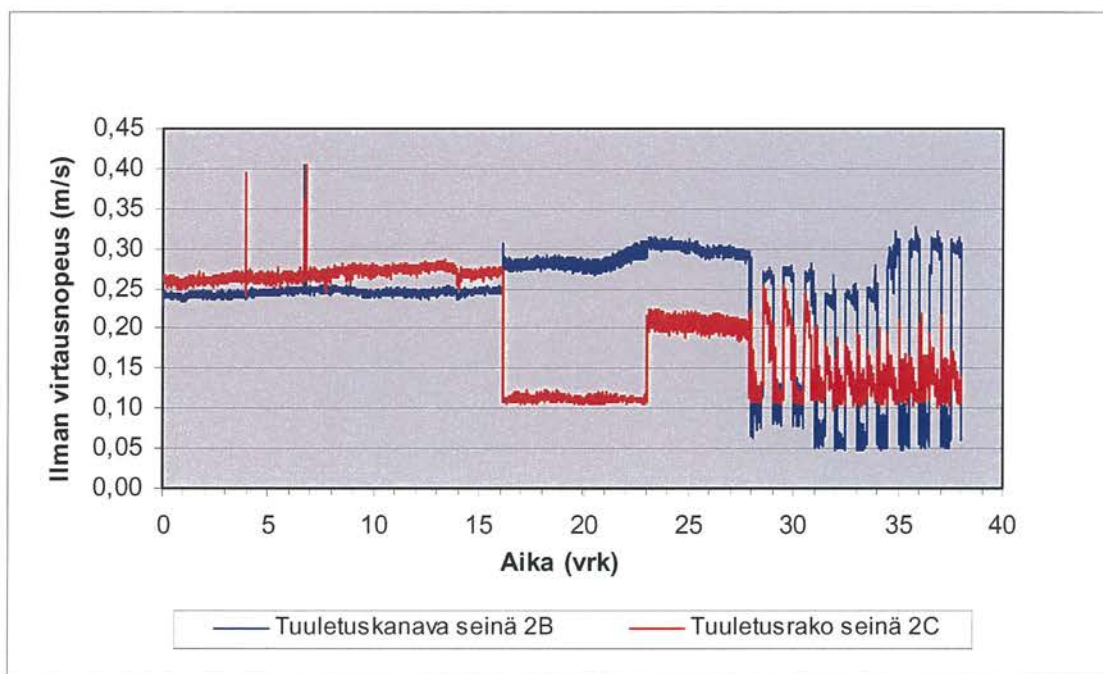
Seinärakenteesta 2B mitatut huokosilman kosteudet nousivat jokaisella jaksolla korkeintaan 70 % RH:iin ja olivat tasaisia jokaisella jaksolla lukuun ottamatta uritetun 25 mm:n paksuisen EPS-eristeen tuuletusurittamatonta ("kannaksen") kohtaa seinän yläosassa. Tässä kohdassa suunnilleen talvijakson puolella välissä suhteellinen kosteus kävi noin 90 % RH:ssa, jonka jälkeen suhteellinen kosteus lähti laskemaan melko voimakkaasti. Talvijakson lopussa rakenteen suhteellinen kosteus oli noin 80 % RH:ssa. Heti kevätojaksen alkupuolella samassa kohdassa suhteellinen kosteus nousi nopeasti aina 100 % RH:n asti. Tämä johtui todennäköisesti siitä, että koelaitteiston kattopintaan talvijakson aikana tiivistynyt ja jäänyt kosteus oli päässyt anturin läpiviennin kohdalta valumaan rakenteeseen (rakennetta purettaessa kattopintaa vasten olevan tiivistysmuovin yläpuolella havaittiin tiivistynyttä irtovettä). Kevätjakson alkupuolella rakenne alkoi kuivua hyvin nopeasti, mikä omalta osaltaan kertoo hyvin pienestä vesimäärästä, joka mittauskohdassa oli ollut.

Seinärakenteesta 2C mitatut huokosilman kosteudet nousivat jokaisella jaksolla korkeintaan 80 % RH:iin ja olivat tasaisia jokaisella jaksolla.

6.3.4 Ilmavirtausmittaus

Seinärakenteen 2B tuuletuskanavaan ja seinärakenteen 2C tuuletusrakoon seinien keskiosalle sijoitetuilla ilmavirtausmittareilla mitattiin tuuletuskanavassa ja -raossa kulkevan ilmavirran nopeutta. Seinärakenteessa 2B S-mallinen tuuletuskanavisto oli tehty julkisivuelementin taustapintaan liimattuun 25 mm:n paksuiseen EPS-eristeeseen jyrsimällä (ks. liitteen 2 sivu 5 ja liitteen 3 kuva 8). Tuuletuskanaviston syvyys oli 25 mm. Seinärakenteessa 2C tuuletusrakoon asennettiin lomittain $25 \times 25 \text{ mm}^2$ puurimoja, joilla hidastettiin ilman virtausta tuuletusraossa (ks. liitteen 2 sivu 6 ja liitteen 3 kuva 9).

Tulokset ilmavirtausmittauksista on esitetty kuvassa 6.25.



Kuva 6.25 Tulokset tuuletuskanavan/ -raon ilmavirtausmittauksista seinärakenteissa 2B ja 2C.

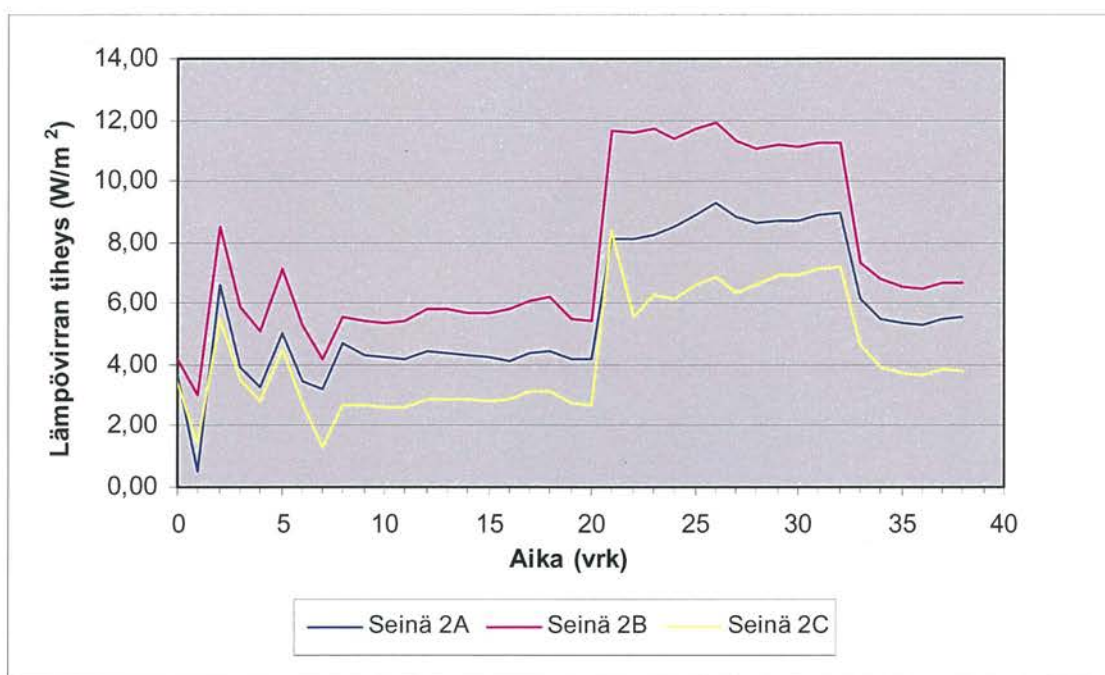
Tuloksista voidaan nähdä, että syksyjaksolla seinärakenteen 2B tuuletuskanavassa ja seinärakenteen 2C tuuletusraossa ilmavirran nopeus oli noin 0,25 m/s. Talvijaksolla seinärakenteessa 2B ilman virtausnopeus hieman kasvoi syksyjaksosta ollen noin 0,28–0,3 m/s. Sen sijaan seinärakenteessa 2C talven alkupuoliskolla ilman virtausnopeus laski selvästi ollen noin 0,1 m/s. Tämä johtui siitä, että koelaitteistossa syysjaksolla höyrystimien edessä ollut iso yhtenäinen muovikalvo poistettiin (ks. kuva 5.11), jolloin höyrystimiltä puhallettu ilma suuntautui kattopintaan pitkin seinärakenteen 2C yläosaan ja sieltä edelleen tuuletusrakoon aiheuttaen vastavirtausta normaalille tuuletusraossa ylöspäin tulevalle konvektiovirtaukselle. Näin tapahtui siitä huolimatta, että ilmavirtausta pyrittiin ohjaamaan alaspäin kattoon ripustettujen pienempien muovikalvojen avulla. Höyrystimiltä kattopintaa pitkin tullut ilmavirta ei häirinnyt seinärakennetta 2B, koska rakenne oli höyrystimiltä päin katsottuna ison jäähdytyslaitteen takana.

Talvijakson puolessavälissä katosta ripustettuja muovikalvoja suurennettiin ja niiden kiinnitystä parannettiin, jolloin seinän 2C tuuletusraossa ilman virtausnopeus kasvoi (noin 0,1 m/s:sta noin 0,2 m/s:iin). Ilman virtausnopeuden kasvun perusteella voitaisiin olettaa, että seinärakenteen 2C tuuletusraossa alhaalta ylöspäin tapahtuva ilmavirtaus voimistuisi, kun vastakkaiseen suuntaan tapahtuva virtaus tuuletusraon yläosassa vähenisi. Jostakin syystä seinärakenteen 2C alaosassa lämpötilat olivat kuitenkin yläosaa korkeammat, mikä taas puoltaisi ylhäältä alaspäin tapahtuvaa ilman virtausta tuuletusraossa. Tältä osin seinärakenteen 2C koetulokset ovat ristiriitaisia.

Kevätjaksolla seinärakenteessa 2B tapahtui suurempaa ilman virtausnopeuden vaihtelua (0,05-0,3 m/s), kuin seinärakenteessa 2C (0,1-0,25 m/s). Vaihtelu tapahtui 12 h:n jaksoissa ja ilmiö johtui pelkästään koelaitteiston ominaisuuksista, koska keväthajalla syklisessä lämpötilan nousuvaiheessa (kesto 12 h) rakenteen pinnan lämmittämiseen käytettiin säteilylämmittimiä, joita ei koko kokeen aikana muuten käytetty. Säteilylämmittimien käytön aikana ei säärasituslaitteistossa käytetä koerakenteen edessä olevan ison jäähdytyskennon puhaltimia lainkaan, jolloin rakenteen pintaan muuten vaikuttavaa ilmavirtaa ei ole. Siitä syystä ilmavirran nopeudet olivat lähellä kynnysarvoa tai kynnysarvossa.

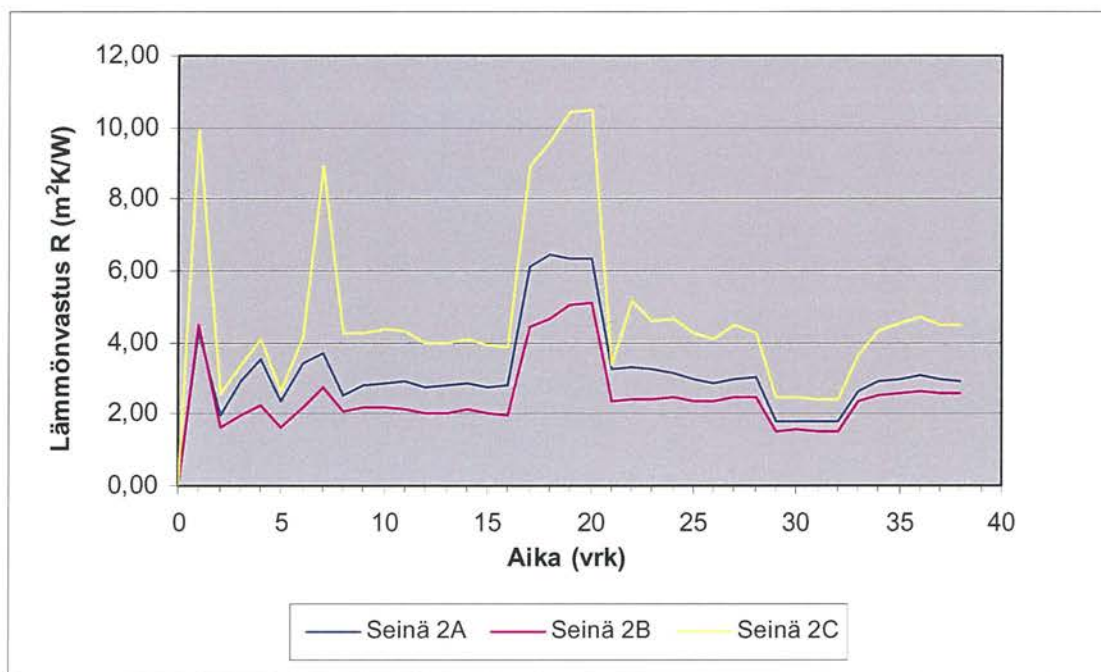
6.3.5 Lämpövirtalevymittaus

Koe-erän 2 seinärakenteiden lämpövirtalevymittausten tulokset on esitetty kuvassa 6.26. Kuvassa 6.27 on esitetty seinärakenteiden lasketut lämmönvastusarvot (R-arvot).



Kuva 6.26

Lämpövirran tiheydet koerakenteiden läpi koe-erässä 2.



Kuva 6.27 Koe-erä 2:n seinärakenteiden lasketut lämmönvastusarvot.

Jokaisella jaksolla seinärakenteen 2B läpi virtasi eniten lämpöä. Vähiten lämpöä siirtyi seinärakenteen 2C läpi. Selvemmin erot tulivat esille talvijaksolla. Seinärakenteessa 2A ei ollut tuuletuskanavistoa seinärakenteeseen 2B verrattuna ja se oli siten lämpöteknisesti seinärakennetta 2B parempi. Seinärakenteessa 2C oli tuuletusrako, mutta siinä käytettiin 5 mm enemmän lämmöneristettä kuin seinärakenteessa 2A. Sen lisäksi seinärakenteessa 2C käytettiin eri lämmöneristeitä kuin muissa seinissä. Seinärakenteen 2C lämmöneristeiden (kivivilla ja tuulensuojalevy) lämmönjohtavuusarvot ovat todennäköisesti pienempiä kuin EPS-eristeen. Lämmöneristeiden lämmönjohtavuusarvoja ei mitattu eikä tilaajalla ollut lämmöneristeiden lämmönjohtavuusarvoja tiedossa.

6.4 Koe-erä 3 (seinärakenteet 3A-3C)

6.4.1 Rakenteiden lämpötilat

Jokaisen jakson lopusta lasketut 6 tunnin keskiarvot on esitetty taulukoissa 6.17-6.20. Kuvissa 6.28-6.31 on esitetty vastaavista antureista mitatut lämpötilat koko kokeen ajalta.

Taulukoissa 6.17-6.20 ja kuvissa 6.28-6.31 esitetyt lyhenteet tarkoittavat seuraavia mittaushaaroja (tarkemmat anturien paikat on merkitty liitteessä 3 oleviin kuviin):

SEINÄ 3A:

S_Pinta_Y	= sisäpinnan pintalämpötila seinän yläosassa
E75_S_Pinta_Y	= 75 mm:n kivivillan sisäpinta seinän yläosassa
E75_U_Pinta_Y	= 75 mm:n kivivillan ulkopinta seinän yläosassa
TR_Y	= tuuletusrako seinän yläosassa
JS_S_Pinta_Y	= julkisivuelementin sisäpinnan pintalämpötila seinän yläosassa (tuuletusraossa)
JS_U_Pinta_Y	= julkisivuelementin ulkopinnan pintalämpötila seinän yläosassa
S_Pinta_A	= sisäpinnan pintalämpötila seinän alaosaassa
E75_S_Pinta_A	= 75 mm:n kivivillan sisäpinta seinän alaosaassa
TR_A	= tuuletusrako seinän alaosaassa
JS_S_Pinta_A	= julkisivuelementin sisäpinnan pintalämpötila seinän alaosaassa (tuuletusraossa)
JS_U_Pinta_A	= julkisivuelementin ulkopinnan pintalämpötila seinän alaosaassa

SEINÄ 3B:

S_Pinta_Y	= sisäpinnan pintalämpötila seinän yläosassa
E75_S_Pinta_Y	= 75 mm:n kivivillan sisäpinta seinän yläosassa
E75K_U_Pinta_Y	= 75 mm:n kivivillan ulkopinta (elementtiin liimatun 25 mm:n paksuisen uritetun EPS-eristeen urittamaton alue eli ”kannas”) seinän yläosassa
TK_Y	= tuuletuskanava seinän yläosassa
TK_U_Pinta_Y	= tuuletuskanavan ulkopinnan pintalämpötila seinän yläosassa
JS_U_Pinta_Y	= julkisivuelementin ulkopinnan pintalämpötila seinän yläosassa
S_Pinta_A	= sisäpinnan pintalämpötila seinän alaosaassa
E75_S_Pinta_A	= 75 mm:n kivivillan sisäpinta seinän alaosaassa
TK_A	= tuuletuskanava seinän alaosaassa
TK_U_Pinta_A	= tuuletuskanavan ulkopinnan pintalämpötila seinän alaosaassa
JS_U_Pinta_A	= julkisivuelementin ulkopinnan pintalämpötila seinän alaosaassa

SEINÄ 3C:

S_Pinta_Y	= sisäpinnan pintalämpötila seinän yläosassa
E50_S_Pinta_Y	= 50 mm:n kivivillan sisäpinta seinän yläosassa
E50_U_Pinta_Y	= 50 mm:n kivivillan ulkopinta seinän yläosassa
E25_U_Pinta_Y	= 25 mm:n EPS-eristeen (irtonaisen) ulkopinta seinän yläosassa
JS_S_Pinta_Y	= julkisivuelementin (liimatun EPS-eristeen) sisäpinnan pintalämpötila seinän yläosassa
JS_U_Pinta_Y	= julkisivuelementin ulkopinnan pintalämpötila seinän yläosassa
S_Pinta_A	= sisäpinnan pintalämpötila seinän alaosassa
E50_S_Pinta_A	= 50 mm:n kivivillan sisäpinta seinän alaosassa
E25_U_Pinta_A	= 25 mm:n EPS-eristeen (irtonaisen) ulkopinta seinän alaosassa
JS_S_Pinta_A	= julkisivuelementin (liimatun EPS-eristeen) sisäpinnan pintalämpötila seinän alaosassa
JS_U_Pinta_A	= julkisivuelementin ulkopinnan pintalämpötila seinän alaosassa

Taulukoissa 6.17-6.20 on esitetty seinärakenteiden pinnoilta ja sisältä mitatut lämpötilat kunkin koejakson lopusta. Talvijaksosta on esitetty neljä eri lämpötilaa: Ennen seinärakenteen 3B korjausta, ennen sähkökatkosta oleva tilanne, sähkökatkoksen jälkeinen tilanne sekä lopullisen talvijakson lopputilanne. Taulukoissa olevat alkutilanteen lämpötilat ovat alle 20 °C, koska syysolosuhdekoe käynnistettiin sääärsituslaitteistossa ennen mittauksen käynnistystä.

Taulukko 6.17 Lämpötilat sisällä ja ulkona (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

Jakso	T_Sisä	T_Ulko
Alkutilanne	16,5	19,4
Syksy	20,0	8,2
Talvi	19,2	-9,2
Kevät	20,9	-2,5

Taulukko 6.18 Lämpötilat rakenteessa 3A antureittain (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

Jakso	S_Pinta_Y	E75_S_Pinta_Y	E75_U_Pinta_Y	TR_Y	JS_S_Pinta_Y	JS_U_Pinta_Y	S_Pinta_A	E75_S_Pinta_A	TR_A	JS_S_Pinta_A	JS_U_Pinta_A
Alkutilanne	17,3	17,4	18,7	19,3	18,7	19,2	16,9	16,9	18,1	18,1	18,5
Syksy	19,3	18,7	13,9	9,8	9,1	8,2	19,2	18,1	9,0	8,6	8,1
Talvi ¹⁾	17,3	15,7	4,3	-7,7	-8,3	-9,1	15,2	11,5	-9,0	-9,0	-9,3
Talvi ²⁾	17,3	15,5	3,0	-8,2	-8,8	-9,3	16,1	11,2	-9,2	-9,3	-9,6
Talvi ³⁾	18,2	18,0	16,8	15,9	15,1	14,2	18,9	18,7	15,4	14,7	14,1
Talvi ⁴⁾	17,6	15,9	3,5	-8,0	-8,6	-9,1	16,4	11,6	-9,0	-9,0	-9,4
Kevät	19,7	18,3	8,3	-1,1	-1,8	-2,3	19,3	15,8	-2,1	-2,3	-2,5

¹⁾ Ennen rakenteen 3B Tyvek – tuulensuojakalvon asennusta

²⁾ Ennen sähkökatkosta

³⁾ Sähkökatkoksen jälkeen, joka kesti noin 2 vrk

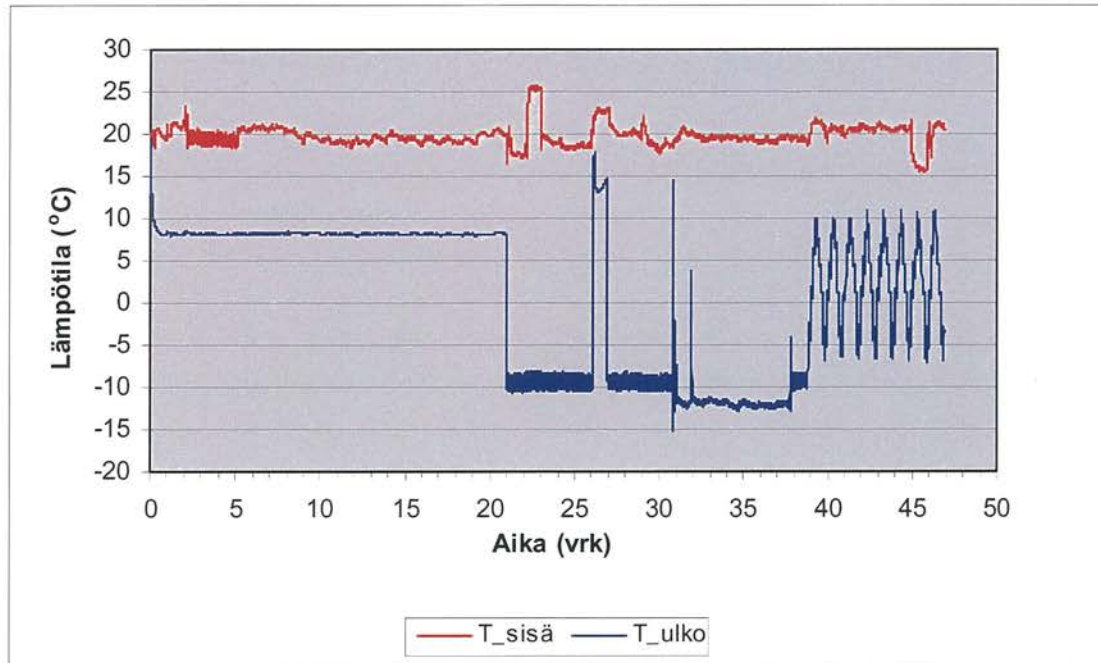
⁴⁾ Ennen kevätjakson aloitusta

Taulukko 6.19 Lämpötilat rakenteessa 3B antureittain (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

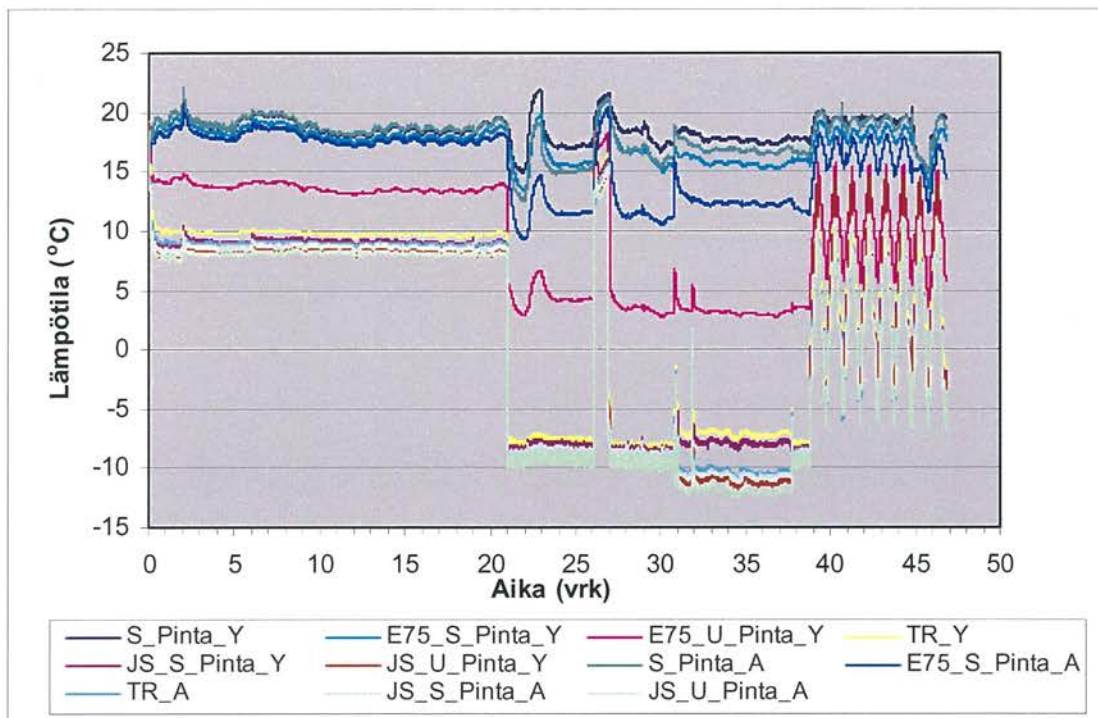
Jakso	S_Pinta_Y	E75_S_Pinta_Y	E75K_U_Pinta_Y	TK_Y	TK_U_Pinta_Y	JS_U_Pinta_Y	S_Pinta_A	E75_S_Pinta_A	TK_A	TK_U_Pinta_A	JS_U_Pinta_A
Alkutilanne	17,8	17,3	18,4	18,4	18,3	18,7	17,3	17,3	17,3	18,2	18,6
Syksy	19,4	18,7	13,1	10,1	8,2	8,2	16,0	11,6	8,8	8,5	8,1
Talvi ¹⁾	18,0	16,6	3,4	-6,5	-9,3	-9,4	7,2	-4,9	-9,1	-9,2	-9,5
Talvi ²⁾	17,5	14,2	-0,6	-5,2	-9,6	-9,8	17,0	12,9	-7,7	-7,4	-9,8
Talvi ³⁾	18,8	18,0	16,5	16,5	16,1	13,9	19,1	18,9	16,1	15,8	13,7
Talvi ⁴⁾	17,8	14,5	-0,4	-5,1	-5,6	-9,6	17,4	13,3	-7,5	-7,2	-9,6
Kevät	19,9	17,5	6,1	1,9	1,2	-2,9	20,1	17,2	-0,4	-0,2	-2,8

Taulukko 6.20 Lämpötilat rakenteessa 3C antureittain (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

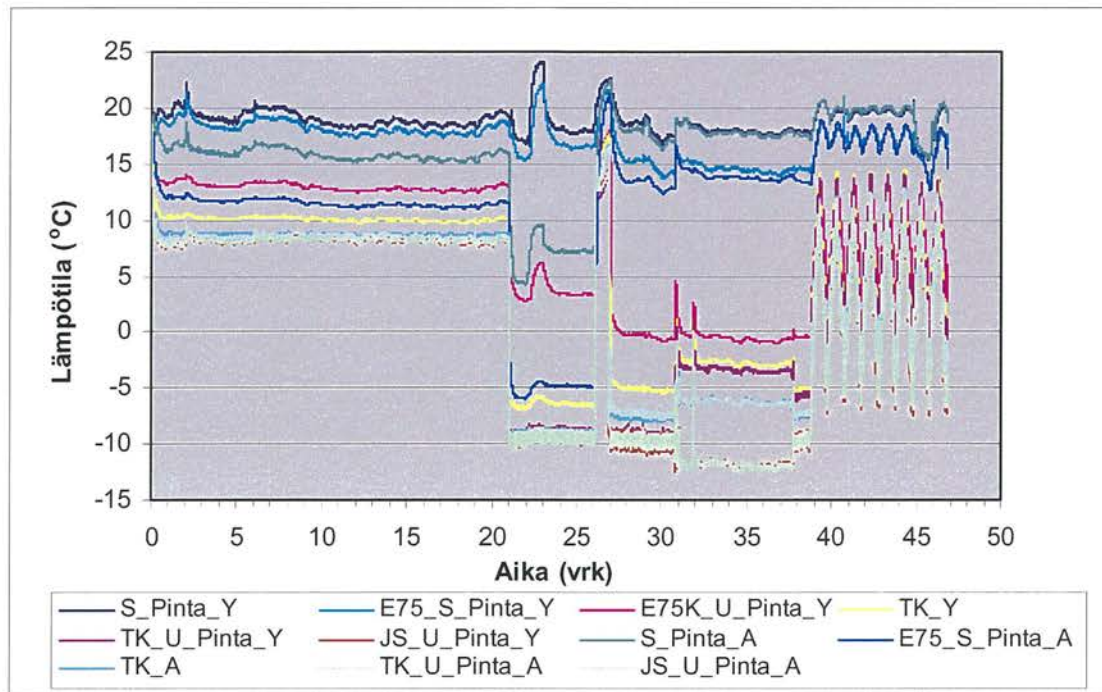
Jakso	S_Pinta_Y	E50_S_Pinta_Y	E50_U_Pinta_Y	E25_U_Pinta_Y	JS_S_Pinta_Y	JS_U_Pinta_Y	S_Pinta_A	E50_S_Pinta_A	E25_U_Pinta_A	JS_S_Pinta_A	JS_U_Pinta_A
Alkutilanne	17,3	17,4	18,0	18,3	18,0	18,2	17,1	16,9	17,7	17,6	18,2
Syksy	18,9	18,2	14,7	13,1	13,1	8,3	18,7	17,7	13,2	12,8	8,3
Talvi ¹⁾	17,3	14,9	6,0	1,9	2,0	-9,2	16,8	13,6	1,7	1,5	-9,2
Talvi ²⁾	17,3	15,0	6,2	1,9	2,0	-9,5	16,9	13,9	1,9	1,3	-9,5
Talvi ³⁾	18,6	18,4	17,2	16,5	16,2	14,0	18,8	18,2	16,6	16,1	14,0
Talvi ⁴⁾	17,8	15,5	6,6	2,3	2,4	-9,3	17,4	14,4	2,2	1,7	-9,3
Kevät	19,8	18,2	11,3	8,0	7,8	-2,7	20,0	17,8	8,5	7,7	-2,6



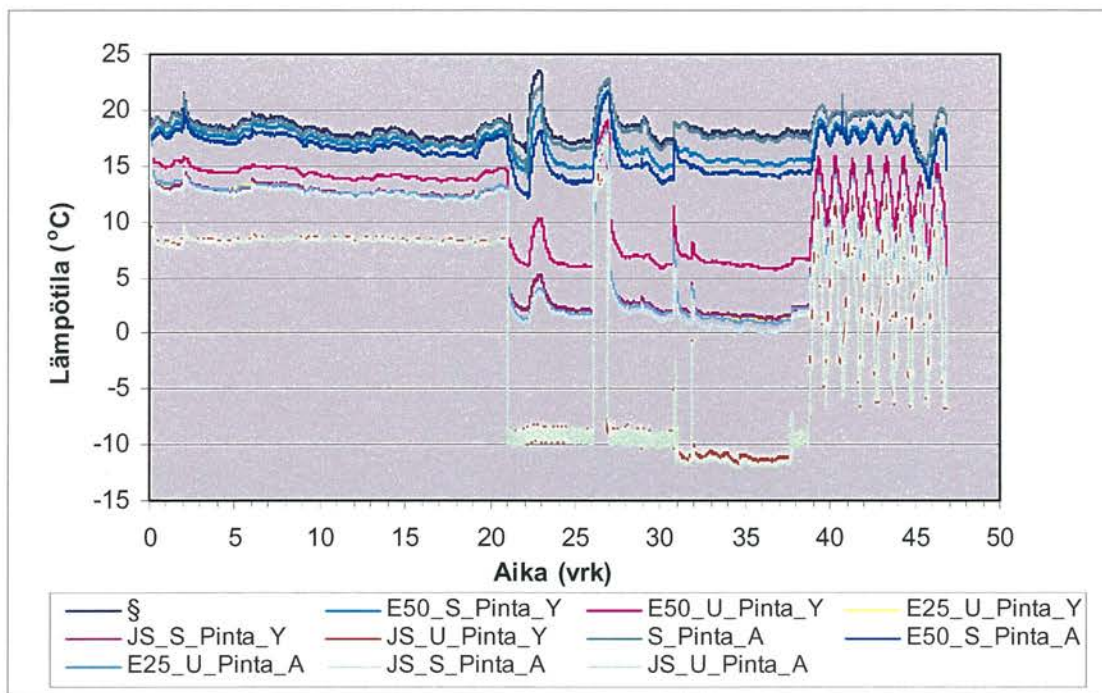
Kuva 6.28 Sisä- ja ulkolämpötilat koe-erä 3:n aikana.



Kuva 6.29 Seinärakenteen 3A lämpötilat kokeen aikana.



Kuva 6.30 Seinärakenteen 3B lämpötilat kokeen aikana.



Kuva 6.31 Seinärakenteen 3C lämpötilat kokeen aikana.

Lämpötilojen osalta jokaisessa rakenteessa ja kaikissa koeolosuhteissa saavutettiin stationääritila.

Selvimmät piikit kuvaajissa johtuvat seinärakenteen 3B korjauksesta, joka näkyy kuvissa vuorokausien 26-27 kohdalla ja koelaitteiston sähkökatkoksesta, joka tapahtui noin 32 vuorokauden kohdalla.

Jokaisesta rakenteesta mitatut lopulliset ulkopintojen pintalämpötilat olivat syksyjaksoilla noin 0-0,1 °C, talvijaksolla 0-0,6 °C ja kevätjaksolla 0,1-0,4 °C alhaisempia kuin ulkoilman lämpötila.

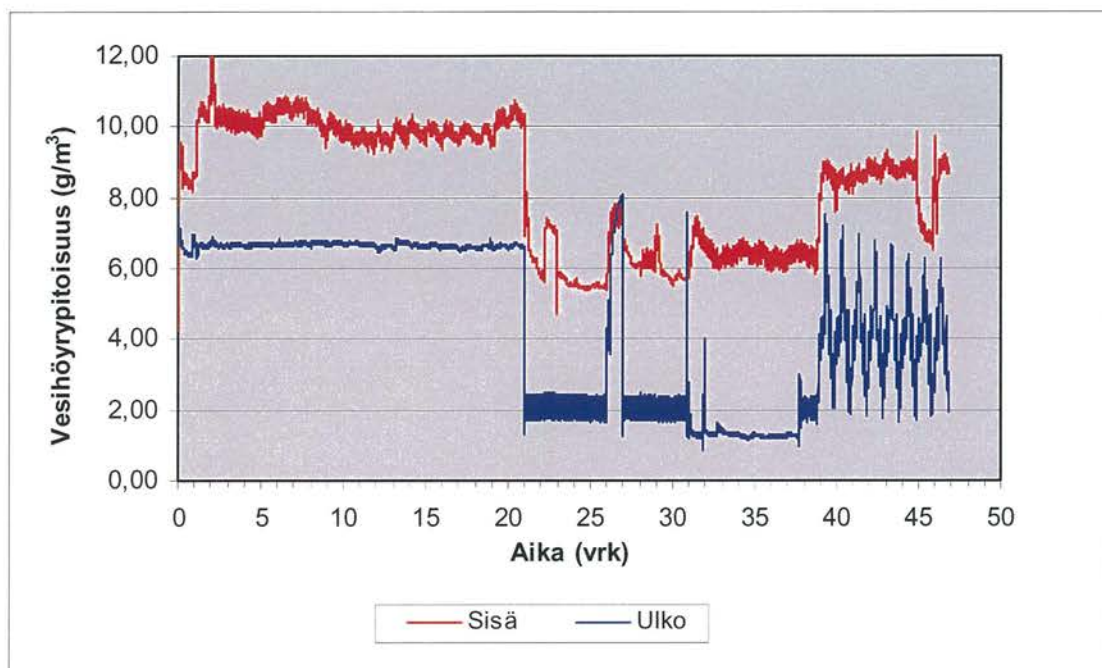
Seinärakenteessa 3A tuuletusraon alaosassa lämpötilat olivat noin yhden asteen (0,8-1,3 °C) verran alhaisempia kuin seinän yläosassa jokaisella jaksolla. Seinän alaosassa tuuletusraossa lämpötilat seurasivat melko tarkkaan ulkoilman lämpötiloja. Talvijaksolla seinärakenteen 3A alaosassa jokaisessa mittauskohdassa lämpötilat olivat alhaisempia kuin seinän yläosassa. Selvin ero syntyi 75 mm kivivillan sisäpinnassa (harkon ulkopinnassa), jossa seinän alaosan lämpötila oli 4,2 °C alhaisempi (11,5 °C vs. 15,7 °C). Sisäpinnan lämpötiloissa seinän ylä- ja alaosan välillä eroa oli 2,1 °C, sisäpinnan alaosan lämpötilan ollessa vain 15,2 °C. Seinän alaosan lämpötilat olivat seinän yläosan lämpötiloja alhaisempia todennäköisesti siksi, että talvella kylmä ilmvirta oli päässyt seinän alaosassa mahdollisesti olleesta raosta tai reiästä rakenteen sisään Tyvek -pintaista tuulensuojalevyä ja levyn alaosan teippauksesta huolimatta.

Seinärakenteessa 3B syksyjaksoilla ja erityisesti talvijaksolla seinän alaosan lämpötilat laskivat huomattavan paljon koko rakenteen osalla. Syksyjaksoilla rakenteen sisäpinnassa ala- ja yläosan välillä lämpötilaero oli 3,4 °C (16,0 °C vs. 19,4 °C) ja 75 mm:n lämmöneristeen sisäpinnassa (harkon ulkopinnassa) lämpötilaero oli 7,1 °C (11,6 °C vs. 18,7 °C). Talvijaksolla seinän ala- ja yläosan välillä lämpötilaerot olivat vieläkin suurempia. Seinän sisäpinnassa eroa oli peräti 10,8 °C (7,2 °C vs. 18,0 °C). 75 mm:n paksuisen lämmöneristeen sisäpinnassa (harkon ulkopinnassa) seinän alaosassa lämpötila laski jopa pakkasen puolelle (-4,9 °C), seinän yläosassa lämpötilan ollessa samassa kohdassa 16,6 °C. Seinärakenteen alaosassa lämpötila laski, koska ulkoilman ilmvirtaus pääsi tunkeutumaan lämmöneristeen sisään tuulensuojan puuttuessa rakenteesta. Talvijakso keskeytettiin ja seinärakennetta 3B korjattiin asentamalla 75 mm:n kivivillan ulkopintaan Tyvek-tuulensuojakalvo. Heti korjauksen jälkeen seinän alaosan lämpötilat lähtivät nousemaan ja talvijakson lopussa seinän alaosassa rakenteen lämpötilat olivat lähellä seinän yläosan lämpötiloja. Selkein ero seinärakenteen 3B lämpötiloissa oli tuuletuskanavassa, jossa seinän alaosassa lämpötila talvijakson päätyttyä oli 2,6 °C alhaisempi (-7,5 °C vs. -5,1 °C) kuin seinän yläosassa. Tuuletuskanavan alaosassa lämpötila oli 1,7 °C ja tuuletuskanavan yläosassa 4,1 °C korkeampi kuin ulkoilman lämpötila. Sekä seinärakenteessa 3A että 3B seinän alaosassa tuuletusraon/ -kanavan lämpötila oli alhaisempi siksi, että sääräsitelaitteiston jäähdytyskennon puhaltimet puhalsivat ilmvirran enemmän kohti seinän keski- ja alaosaa.

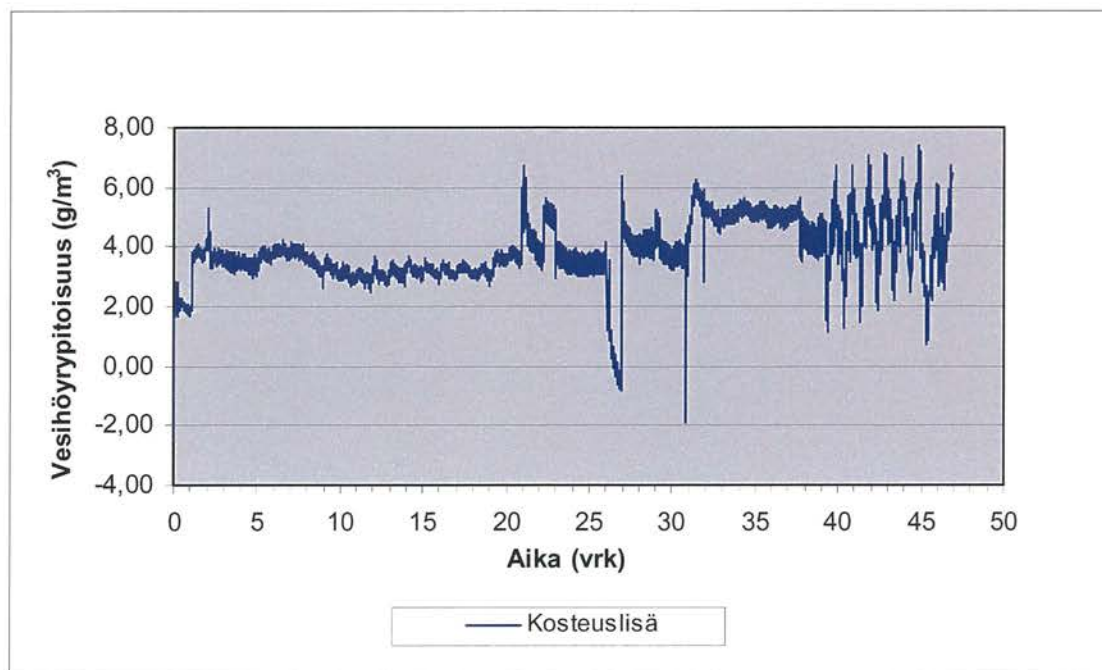
Seinä rakenteessa 3C lämpötilat olivat jokaisella jaksolla seinän ylä- ja alaosissa lähellä toisiaan ja lämpötilakentät olivat seinä rakenteessa 3C loogisia koko kokeen ajan.

6.4.2 Vesihöyrypitoisuudet ja kosteuslisä

Koe-erä 3:n sisä- ja ulkoilman kokeen aikaiset vesihöyrypitoisuudet on esitetty kuvassa 6.32 ja kosteuslisä kuvassa 6.33.



Kuva 6.32 Sisä- ja ulkoilman vesihöyrypitoisuudet koe-erä 3:n aikana.



Kuva 6.33 Kosteuslisä koe-erä 3:n aikana.

Koe-erä 3:n aikana todellinen kosteuslisä vaihteli syksy- ja talvijaksolla pääsääntöisesti 3-5 g/m³ välillä ja kevätjaksolla 1-7 g/m³ välillä. Koko kokeen aikana 5 minuutin välein tallennetusta mittausdatasta laskettuna kosteuslisän keskiarvo oli 3,9 g/m³.

6.4.3 Suhteelliset kosteudet rakenteissa

Jokaisen jakson lopusta lasketut 6 tunnin keskiarvot on esitetty taulukoissa 6.21-6.24. Kuvissa 6.34-6.37 on esitetty vastaavista antureista mitatut suhteelliset kosteudet koko kokeen ajalta.

Taulukoissa 6.21-6.24 ja kuvissa 6.34-6.37 esitetyt lyhenteet tarkoittavat seuraavia rakenteen suhteellisen kosteuden mittauskohtia (tarkemmat anturien paikat on merkitty liitteessä 2 oleviin kuviin):

SEINÄ 3A:

E75_S_Pinta_Y	= 75 mm:n kivivillan sisäpinta seinän yläosassa
E75_U_Pinta_Y	= 75 mm:n kivivillan ulkopinta seinän yläosassa
TR_Y	= tuuletusrako seinän yläosassa
E75_S_Pinta_A	= 75 mm:n kivivillan sisäpinta seinän alaosassa
TR_A	= tuuletusrako seinän alaosassa

SEINÄ 3B:

E75_S_Pinta_Y	= 75 mm:n kivivillan sisäpinta seinän yläosassa
E75K_U_Pinta_Y	= 75 mm:n kivivillan ulkopinta (elementtiin liimatun 25 mm:n paksuisen uritetun EPS-eristeen urittamaton alue eli ”kannas”) seinän yläosassa
TK_Y	= tuuletuskanava seinän yläosassa
E75_S_Pinta_A	= 75 mm:n kivivillan sisäpinta seinän alaosassa
TK_A	= tuuletuskanava seinän alaosassa

SEINÄ 3C:

E50_S_Pinta_Y	= 50 mm:n kivivillan sisäpinta seinän yläosassa
E50_U_Pinta_Y	= 50 mm:n kivivillan ulkopinta seinän yläosassa
E25_U_Pinta_Y	= 25 mm:n EPS-eristeen (irtonaisen) ulkopinta seinän yläosassa
E50_S_Pinta_A	= 50 mm:n kivivillan sisäpinta seinän alaosassa
E25_U_Pinta_A	= 25 mm:n EPS-eristeen (irtonaisen) ulkopinta seinän alaosassa

Taulukko 6.21 Suhteelliset kosteudet sisällä ja ulkona (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

Jakso	RH_Sisä	RH_Ulko
Alkutilanne	30,1	39,0
Syksy	59,1	78,2
Talvi	37,3	82,4
Kevät	48,6	74,5

Taulukko 6.22 Suhteelliset kosteudet rakenteessa 3A antureittain (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

Jakso	E75_S_Pinta_Y	E75_U_Pinta_Y	TR_Y	E75_S_Pinta_A	TR_A
Alkutilanne	30,2	31,0	31,6	28,8	39,8
Syksy	42,6	56,7	68,9	41,3	75,0
Talvi ¹⁾	19,2	37,9	72,2	20,3	81,0
Talvi ²⁾	36,1	56,3	74,6	19,5	81,6
Talvi ³⁾	37,1	49,6	62,6	23,3	54,0
Talvi ⁴⁾	40,1	62,1	75,1	18,4	82,1
Kevät	38,7	53,6	64,9	22,6	73,1

¹⁾ Ennen rakenteen 3B Tyvek – tuulensuojakalvon asennusta

²⁾ Ennen sähkökatkosta

³⁾ Sähkökatkoksen jälkeen, joka kesti noin 2 vrk

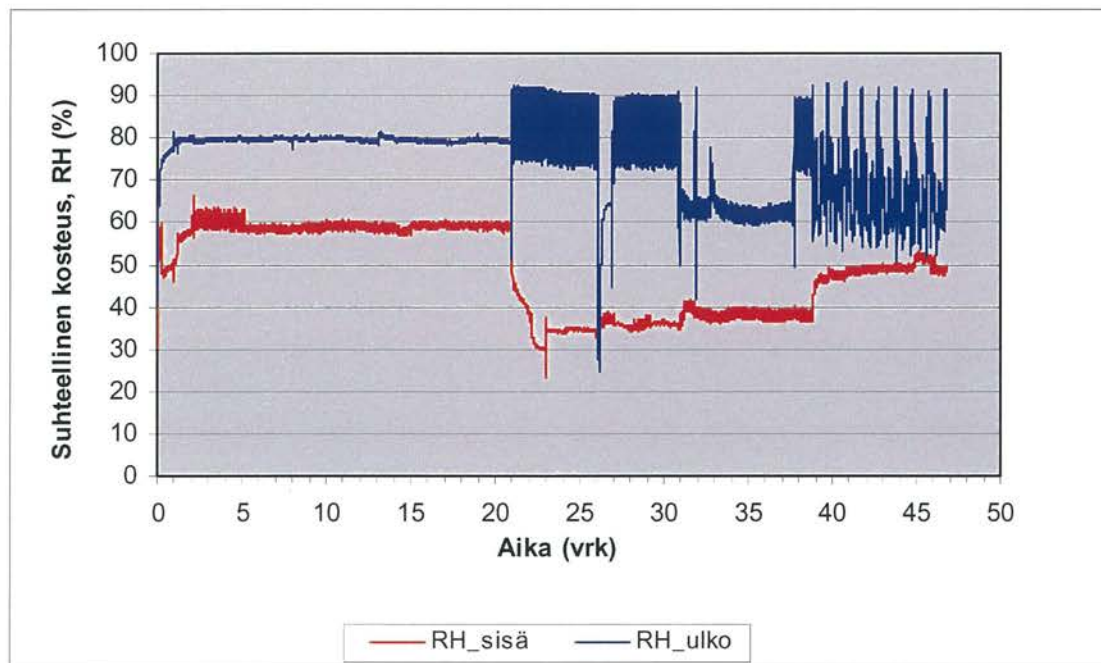
⁴⁾ Ennen kevätjakson aloitusta

Taulukko 6.23 Suhteelliset kosteudet rakenteessa 3B antureittain (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

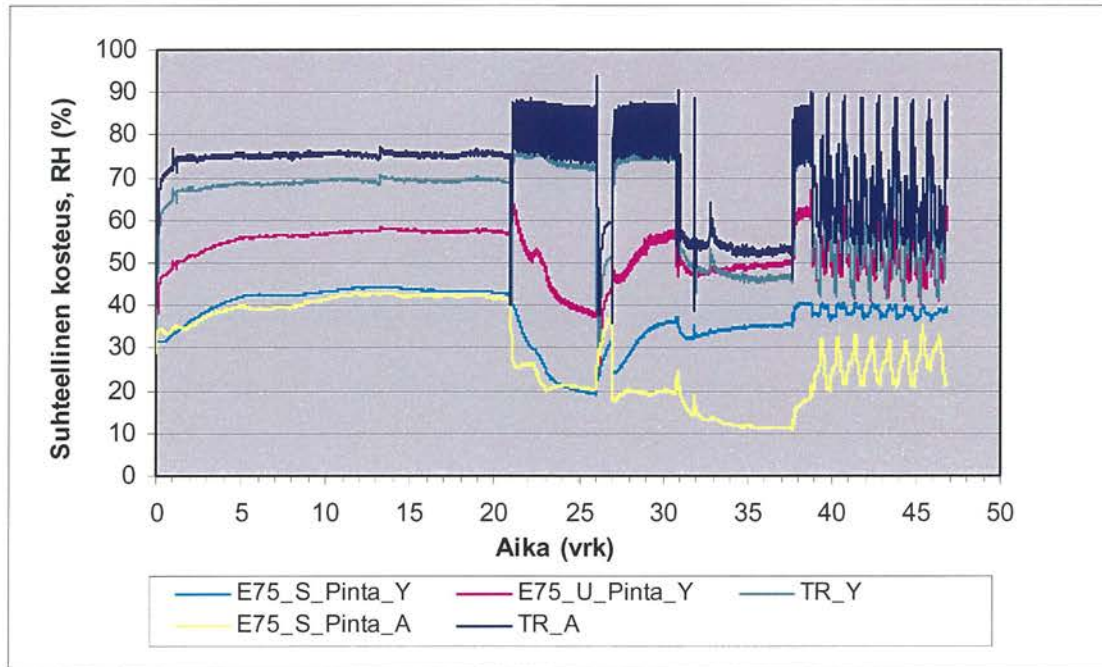
Jakso	E75_S_Pinta_Y	E75K_U_Pinta_Y	TK_Y	E75_S_Pinta_A	TK_A
Alkutilanne	29,4	27,4	38,1	33,8	35,3
Syksy	41,4	60,3	68,8	63,3	73,6
Talvi ¹⁾	16,6	39,1	65,5	59,1	79,0
Talvi ²⁾	20,2	52,1	60,5	18,7	69,6
Talvi ³⁾	28,5	52,6	45,8	26,4	59,7
Talvi ⁴⁾	22,4	56,9	61,5	15,3	69,1
Kevät	28,7	57,0	55,6	22,0	60,2

Taulukko 6.24 Suhteelliset kosteudet rakenteessa 3C antureittain (6 tunnin keskiarvot jaksojen lopussa).

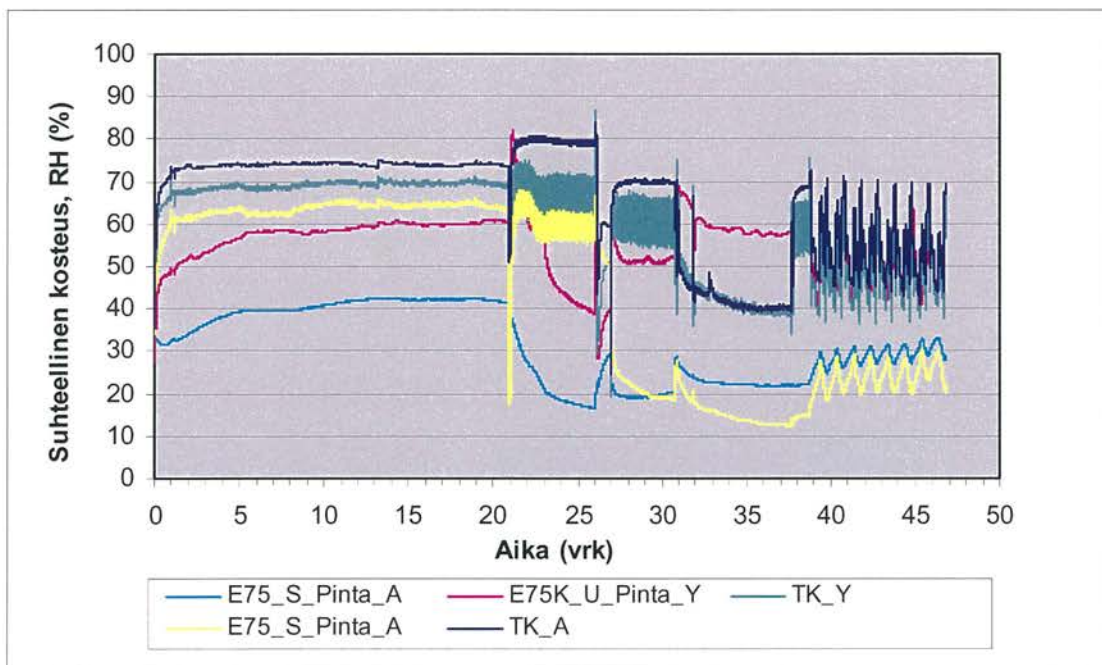
Jakso	E50_S_Pinta_Y	E50_U_Pinta_Y	E25_U_Pinta_Y	E50_S_Pinta_A	E25_U_pinta_A
Alkutilanne	26,8	24,3	24,9	24,9	23,4
Syksy	48,0	63,0	68,5	43,8	59,1
Talvi ¹⁾	37,5	69,0	92,0	27,7	58,8
Talvi ²⁾	33,6	62,9	81,6	23,7	51,5
Talvi ³⁾	35,9	55,2	62,5	29,7	43,8
Talvi ⁴⁾	34,1	64,8	84,3	24,8	56,8
Kevät	39,6	66,5	76,1	30,2	51,7



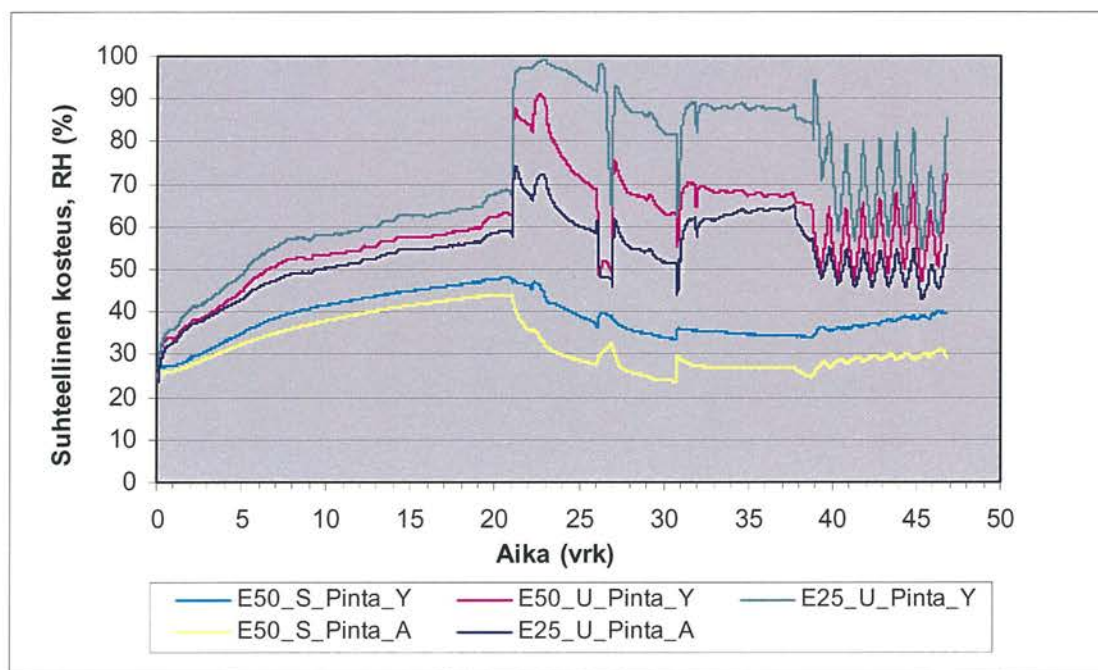
Kuva 6.34 Sisä- ja ulko-olosuhteiden suhteelliset kosteudet koe-erä 3:n aikana.



Kuva 6.35 Seinärakenteen 3A suhteelliset kosteudet kokeen aikana.



Kuva 6.36 Seinärakenteen 3B suhteelliset kosteudet kokeen aikana.



Kuva 6.37 Seinärakenteen 3C suhteelliset kosteudet kokeen aikana.

Rakenteista mitatut huokosilman suhteelliset kosteudet saavuttivat kokeen aikana stationääritilan käytännössä kaikissa seinärakenteissa ja olosuhteissa. Kuvissa vuorokausien 26-27 kohdilla on näkyvissä seinärakenteen 3B korjauksesta sekä vuorokauden 32 kohdalla sähkökatkoksesta aiheuttamat piikit. Vuorokausien 32-39 välisenä aikana (sähkökatkoksen jälkeen) säärasituslaitteiston olosuhteita jouduttiin ajamaan manuaalisella säädöllä, jolloin ulkoilman suhteellista kosteutta ei saatu pidettyä kuin noin 60 % RH:ssa. Talvijakson loppu (vuorokaudet 39-41) pystyttiin säärasituslaitteistolla ajamaan jälleen tietokoneohjauksella, jolloin ulkoilman suhteellinen kosteus oli 70-90 % RH. Ulkoilman suhteellisen kosteuden lasku ja uudelleen nousu näkyi välittömästi myös seinärakenteen 3A tuuletusraossa sekä seinärakenteen 3B tuuletuskanavassa.

Syysjaksolla seinärakenteissa 3A ja 3B saavutettiin stationääritila nopeasti kokeen alkamisen jälkeen. Seinärakenteen 3A tuuletusraossa ja seinärakenteen 3B tuuletuskanavassa seinien alaosissa suhteelliset kosteudet olivat noin 5 % RH ja seinän yläosissa noin 10 % RH alhaisempia kuin ulkoilmassa ollen molempien seinien osalla noin 70-75 % RH.

Talvijaksolla seinärakenteen 3A tuuletusraossa ja seinärakenteen 3B tuuletuskanavassa suhteelliset kosteudet nousivat 5-10 % RH ulkoilman suhteelliseen kosteuteen nähden ollen seinärakenteessa 3A välillä 75-88 % RH ja seinärakenteessa 3B välillä 70-80 % RH. Muiden mittauspisteiden osalla suhteelliset kosteudet vaihtelivat molemmissa seinärakenteissa 3A ja 3B talvijakson aikana jonkin verran. Suhteelliset kosteudet pysyivät kuitenkin koko talvijakson ajan alle 65 % RH. Kevätjaksolla rakenteiden suhteelliset kosteudet pysyivät melko tasaisina ja alhaisina.

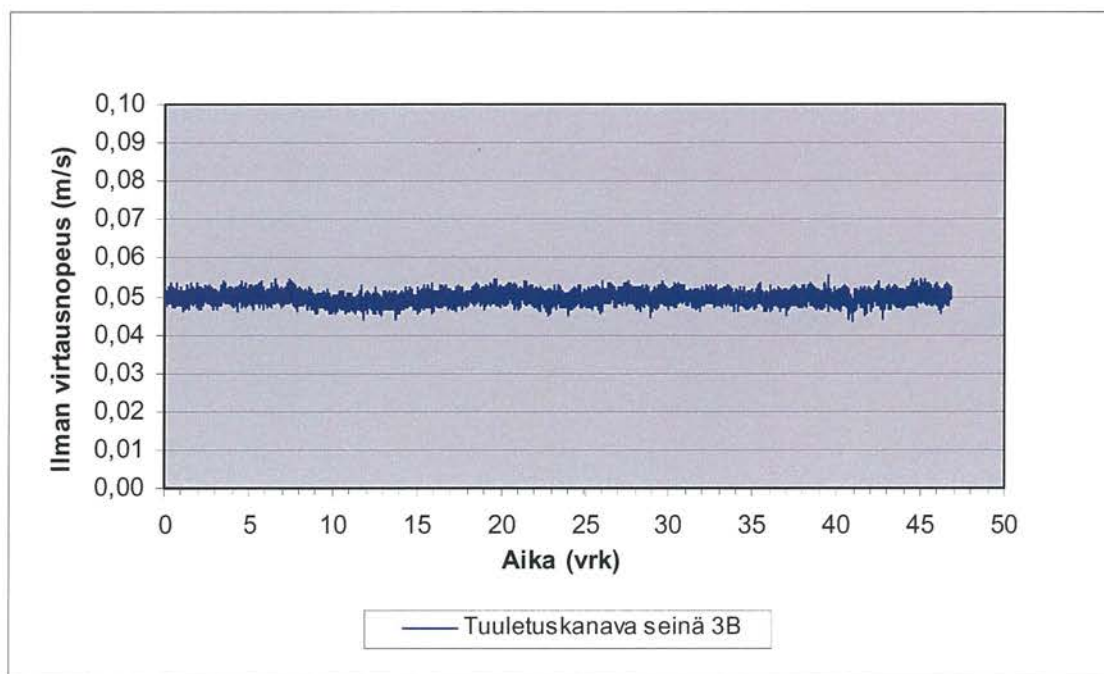
Seinäarakenteessa 3C suhteelliset kosteudet eivät saavuttaneet syksyjaksolla aivan stationääritilaa, mutta tässäkin rakenteessa suhteelliset kosteudet jäivät syksyjaksolla selvästi 80 % RH:n alapuolelle. Talvijakson alkupuolella 25 mm:n paksuisen irtoeristeen ulkopinnassa seinän yläosassa suhteellinen kosteus nousi nopeasti aina lähes 100 % RH asti lähtien kuitenkin muutaman vuorokauden kuluttua laskemaan. Lämpötilat ko. mittauskohdassa olivat muutaman asteen (n. 2-3 °C) nollan yläpuolella, jolloin rakenteeseen mahdollisesti kondensoituneen kosteuden jäätymistäkään ei voinut tapahtua. (Veden jäätyessä RH-anturit eivät pysty reagoimaan normaalisti ja jäätymistilanteessa mittausanturin suhteellisen kosteuden arvo alkaa yleensä laskea).

Seinäarakenteen 3B korjauksen yhteydessä säärasituslaitteiston talviolosuhte keskeytettiin, jolloin rakenteen lämpötilat nousivat. Samaan aikaan seinäarakenteen 3C 25 mm:n paksuisen lämmöneristeen ulkopinnassa suhteellinen kosteus nousi uudelleen noin 97-98 % RH:n alueelle. Seinäarakenteen 3B korjauksen jälkeen irtoeristeen ulkopinnan suhteellinen kosteus laski jälleen ja talvijakson loppupuolella suhteellinen kosteus alkoi tässä kohdassa vakiintua noin 90 % RH:iin. Muissa mittauskohdissa seinäarakenteen 3C suhteelliset kosteudet olivat koko kokeen ajan pääsääntöisesti selvästi alle 80 % RH.

6.4.4 Ilmavirtausmittaukset

Seinäarakenteen 3B tuuletuskanavaan seinän keskiosalle sijoitetuilla ilmavirtausmittarilla mitattiin tuuletuskanavassa kulkevan ilmavirran nopeutta. Seinäarakenteessa 3B S-mallinen tuuletuskanavisto oli tehty julkisivuelementin taustapintaan liimattuun 25 mm:n paksuiseen EPS-eristeeseen jyrsimällä (ks. liitteen 2 sivu 8 ja liitteen 3 kuva 11). Tuuletuskanaviston syvyys oli 25 mm. Tuuletuskanaviston kanavat olivat kapeampia ja kanavia oli tiheämmin kuin seinäarakenteen 2B S-uritetussa tuuletuskanavistossa. Seinäarakenteen 3A tuuletusraosta ilman virtausnopeutta ei mitattu.

Tulokset ilmavirtausmittauksesta on esitetty kuvassa 6.38.

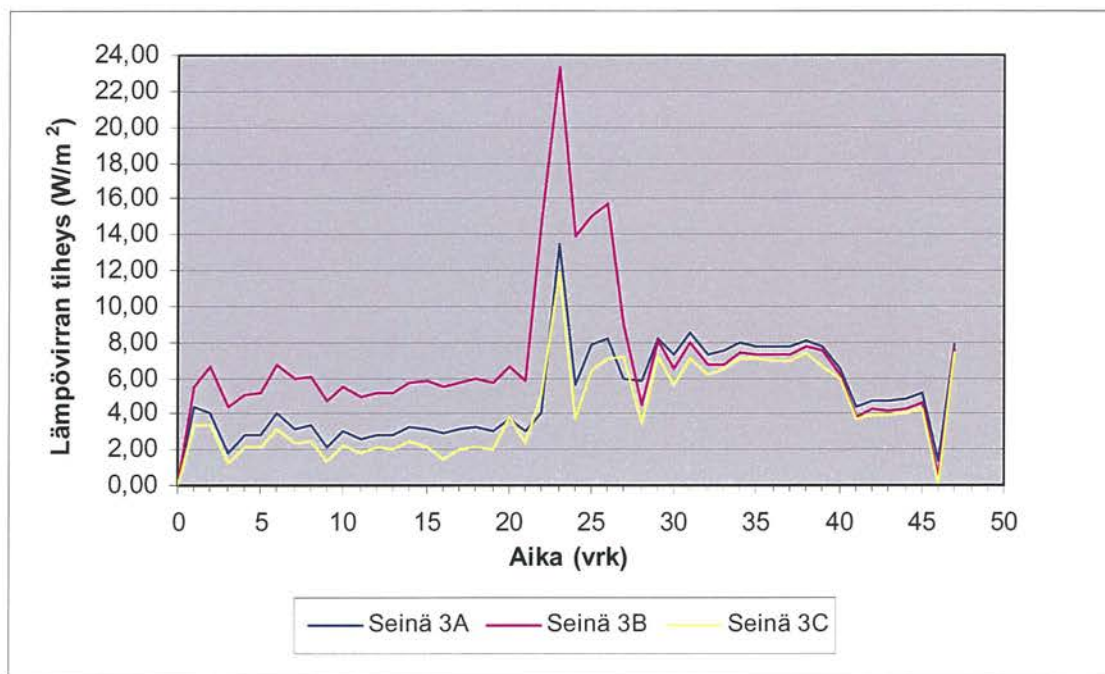


Kuva 6.38 Tulokset tuuletuskanavan ilmapvirtausmittauksesta seinärakenteessa 3B.

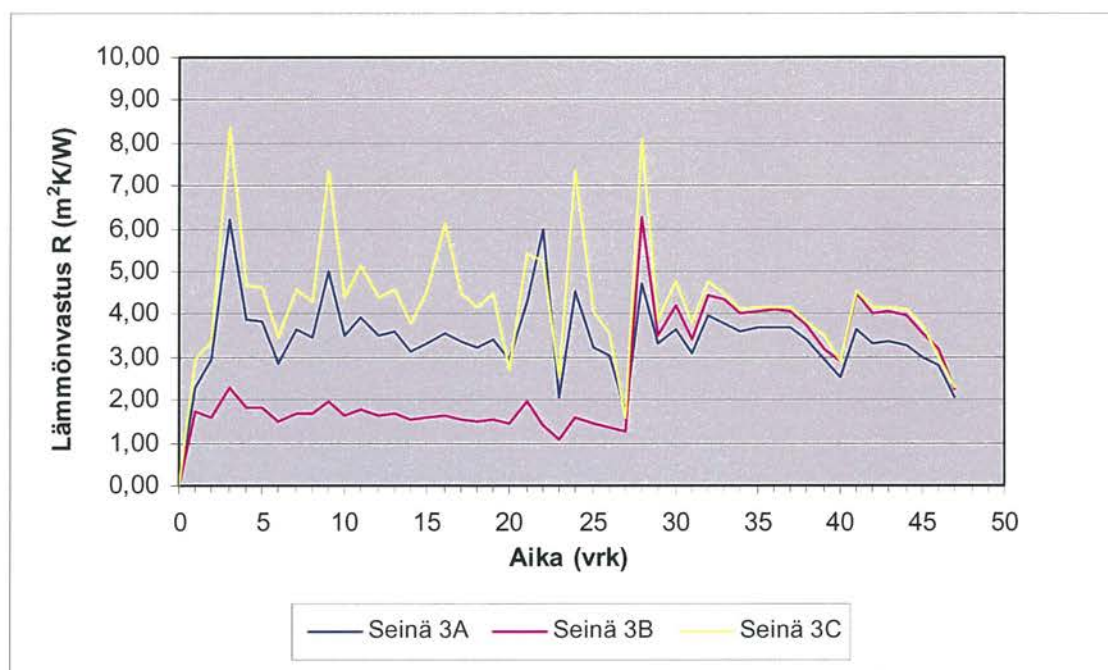
Mittauksen perusteella voidaan todeta, että seinän 3B tuuletuskanavassa ilmavirran nopeus oli koko kokeen ajan ns. kynnyksarvossa (tässä tapauksessa kokeessa olleen mittarin kynnyksarvo oli noin 0,05 m/s). Tätä suuremmaksi ilmapvirtaus ei koko kokeen aikana noussut.

6.4.5 Lämpövirtalevy mittaukset

Koe-erä 3:n seinärakenteiden lämpövirtalevy mittausten tulokset on esitetty kuvassa 6.39. Kuvassa 6.40 on esitetty seinärakenteiden lasketut lämmönvastusarvot (R-arvot).



Kuva 6.39 Lämpövirran tiheydet koerakenteiden läpi koe-erässä 3.



Kuva 6.40 Seinärakenteiden lasketut lämmönvastusarvot koe-erässä 3.

Jokaisella jaksolla seinärakenteen 3C läpi virtasi vähiten lämpöä. Tämä johtui siitä, että seinärakenteissa 3A ja 3B on tuuletusrako/ -kanava. Syksyjaksolla ja talvijakson alkupuolella selvästi eniten lämpöä siirtyi seinärakenteen 3B läpi, mikä johtui ulkoilman virtauksen pääsystä rakenteen sisään. Kevätjaksolla lämpövirtojen erot pienentyivät eri seinärakenteiden välillä.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kaikissa koe-erissä rakenteiden sisäpintojen pintalämpötilat olivat jonkin verran alhaisempia kuin sisäilman lämpötilat, joka on rakenteiden pintavastuksista johtuva normaali ilmiö. Umpirakenteisissa seinissä (ts. ilman tuuletusrakoa olevissa seinärakenteissa) lämpötilakentät olivat loogisia ja seinän ylä- ja alaosien välillä ei ollut keskenään suuria lämpötilaeroja.

Tuuletusraollisten seinärakenteiden 1C ja 2C sekä tuuletuskanavallisen seinärakenteen 2B lämpötilakentissä havaittiin selviä eroja seinien ylä- ja alaosien välillä. Yhtenä syynä lämpötilakenttien eroavaisuuksiin voidaan pitää sääräsitelaitteiston ulkokammiossa olevaa jäähdytintä, joka puhalsi jäähdytettyä ilmaa voimakkaasti koeseinien keski- ja alaosaan kohti. Puhaltimilta tuleva ilma on selvästi ulkokammion ilmaa kylmempää. Puhaltimilta tuleva ilma vaikutti myös rakenteiden tuuletusraoista ja –kanavista tehtyihin ilmavirtausmittauksiin. Tämän takia ilmavirtausmittauksiin tulee suhtautua kriittisesti. Toisaalta esimerkiksi seinärakenteiden 1C ja 3B ilmavirtausmittaustulosten perusteella havaittiin kuitenkin, että ilmavirta ei kulkenut tuuletusraon tai –kanavan läpi siitäkään huolimatta, että rakenne oli alttiina voimakkaalle pakotetulle konvektiolle. Tuuletusraon toimimattomuus lisäsi seinärakenteiden ylä- ja alaosan lämpötilaeroja entisestään. Tällaisissa tapauksissa tuuletusrako tai –kanava ei todennäköisesti toimisi käytännössäkään rakenteita kuivattavana tekijänä. Joka tapauksessa kokeiden perusteella nähtiin, että ilmavirran nopeudet jäivät tämän tutkimuksen tuuletetuissa seinärakenteissa alhaiselle tasolle, jos niitä verrataan ns. normaaleihin tuuletusraollisiin seiiniin, joissa ilmavirran nopeus on tyypillisesti 0,05 - 0,2 m/s. Seinärakenteen 2B tuuletuskanavistossa ja seinärakenteen 2C tuuletusraossa ilmavirtausmittausten mukaan ilma liikkui kuitenkin riittävästi, mutta niissäkin tapauksissa laitteiston puhaltimilla oli merkittävä vaikutus asiaan. Voidaankin todeta, että sääräsitelaitteiston ominaisuuksista johtuen seinärakenteiden tuuletusraoista tai –kanavista rakenteiden lämpötilakenttää tai rakenteiden kuivumista silmällä pitäen ei saatu täysin luotettavaa kuvaa.

Rakenteiden ulkopintojen lämpötilat olivat seinärakenteesta ja koejaksosta riippuen 0-1,5 °C alhaisempia kuin ulkoilman lämpötila. Ilmiö johtui osittain rakenteiden pinnoista lähtevästä lämpösäteilystä kohti ulkokammion kylmiä lattia-, seinä- ja kattopintoja. Osa mitatuista lämpötilaeroista voi johtua myös lämpötila-anturien mittauserpävarmuudesta.

Seinärakenteiden 1A ja 1B julkisivuelementin taustapinnan huokosilman suhteellisen kosteuden nousu aiheutui rakenteen sisäpuolelta (sisäilmasta) diffuusiolla siirtyvästä

kosteudesta ja rakenteen eri puolilla olevasta lämpötilaerosta. Seinärakenteen 1C tuuletusraossa suhteellinen kosteus jäi syksyjaksoilla selvästi alhaisemmaksi, koska tuuletusraossa virtaava ilma kuivatti rakennetta, vaikkakin ilmavirtausmittausten mukaan ilman liike oli hyvin pientä. Talvijaksolla seinärakenteisiin 1A ja 1B sekä seinärakenteen 1C yläosaan tiivistyi ja jäättyi kosteutta. Seinärakenteen 1C tuuletusraossa suhteellinen kosteus nousi selvästi seinän alaosaan korkeammaksi erityisesti talvijaksolla sekä kevätjakson alkupuolella. Tuuletusrakoon syntyi seisova ilma, joka toimi ilmeisesti myös lisälämmöneristeenä. Talvella ilman virtaus tuuletusraossa saattoi vähentyä siitä syystä, että sisäinen konvektio kierrätti ilmaa lähinnä rakenteen sisällä, koska lämmöneristeen ulkopinnassa ei ollut tuulensuojamateriaalia. Myös tuuletusraossa ollut ilmavirtausanturi todennäköisesti esti jonkin verran ilman liikettä seinärakenteen 1C tuuletusraossa.

Kevätjakson jatkuessa pidemmälle koe-erän 1 seinärakenteet alkoivat kuivua lukuun ottamatta seinärakenteen 1B yläosaa. EPS-eristeessä kosteus siirtyi mineraalivillaan nähden huomattavasti hitaammin, jolloin seinärakenteen 1B kuivuminen oli luonnollisesti selvästi hitaampaa kuin seinärakenteiden 1A ja 1C kuivuminen.

Koe-erän 1 seinärakenteista 1A ja 1B toimivat kosteusteknisesti huonosti ja seinärakenne 1C melko huonosti. Selvimpänä syynä koe-erän 1 seinärakenteiden huonoon kosteustekniseen toimivuuteen voidaan pitää seinärakenteiden sisäpinnan liian pientä vesihöyrynvastusta suhteessa ulkopinnan vesihöyrynvastukseen. Pinnoittamattomalla, suhteellisen ohuella harkkoseinällä vesihöyrynvastus oli melko pieni. Harkkoseinän saumat havaittiin lisäksi muutamissa kohdissa melko ohuiksi. Epätiivit saumakohdat edesauttoivat kosteuden siirtymistä voimakkaammin seinärakenteen läpi, jolloin kosteus siirtyi kokeen aikana diffuusion lisäksi konvektiovirtausten mukana.

Koe-erän 2 seinärakenteet toimivat kosteusteknisesti hyvin ja selvästi paremmin kuin koe-erän 1 seinärakenteet. Rakenteiden suhteelliset kosteudet pysyivät syksyjaksoilla kaikissa rakenteissa alle 80 % RH, jota yleisesti pidetään useiden materiaalien homehtumisrajana, kun lämpötila on selvästi nollan yläpuolella (Viitanen 1996). Talvijaksolla erityisen tärkeää seinän kosteusteknisen toimivuuden kannalta on se, että rakenteeseen ei kondensoidu liikaa kosteutta. Yhteenkään koe-erän 2 rakenteeseen ei kosteutta mittausten mukaan tiivistynyt. Seinärakenteessa 2A mitattiin korkeimmat suhteelliset kosteudet talvijaksolla ja ne olivat noin 85 % RH eli silloinkin oltiin selvästi kondensoitumisrajan alapuolella. Ainoan poikkeuksen teki seinärakenteen 2B ”kannaksen” kohta, jossa kevätjakson alkupuolella suhteellinen kosteus nousi nopeasti 100 % RH:iin. Todennäköisimpänä syynä tähän voidaan pitää kuitenkin koelaitteiston kattopintaan tiivistynyttä kosteutta, joka pääsi rakenteen sisään kosteusanturin johdon läpiviennin kautta.

Koska syksy- ja talvijaksoilla ei kosteutta koe-erän 2 rakenteisiin juurikaan kertynyt, ei rakenteiden kuivumiskyvystä saatu selvää kuvaa. Kokeen aikana keväthajalla jokaisessa rakenteessa suhteelliset kosteudet pysyivät tasaisen alhaisina tai laskivat jonkin verran.

Koe-erän 2 tavoin koe-erä 3:n seinärakenteiden suhteelliset kosteudet pysyivät syksyjaksolla alle 80 % RH. Koe-erän 3 seinärakenteista 3A ja 3B toimivat kosteusteknisesti koko kokeen ajan hyvin. Seinärakenne 3C toimi kosteusteknisesti hyvin lukuun ottamatta talvijakson alkuosaa, jolloin rakenteen suhteellinen kosteus 25 mm:n paksuisen EPS-irtoeristeen ulkopinnassa nousi lähelle 100 % RH:a. Seinärakenteen 3C yläosaan tiivistyi todennäköisesti talvijakson alkupuolella kosteutta. Tiivistyneen kosteuden määrä oli kuitenkin todennäköisesti pieni, koska rakenne alkoi kuivua jo talvijaksolla ja erityisen hyvin keväthajon aikana. Seinärakenteiden 3A ja 3B huokosilman suhteelliset kosteudet pysyivät talvijaksolla koko ajan alle 80 % RH eli rakenteen huokosilman suhteellinen kosteus oli selvästi kondensoitumisriskin alapuolella.

Koska syksy- ja talvijaksoilla kosteutta kertyi koe-erän 3 rakenteisiin vain vähäinen määrä, ei rakenteiden kuivumiskyvystä saatu selvää kuvaa. Kokeen aikana keväthajalla jokaisessa rakenteessa suhteelliset kosteudet pysyivät tasaisen alhaisina.

Seinärakenteen 3A hyvä kosteustekninen toimivuus johtuu tuuletusraosta, jonka kautta rakenteeseen kertynyt kosteus pääsee tuuletumaan pois. Koe kuitenkin osoitti, että vaikka seinärakenteen 3A tuuletusrako on ainoastaan 10 mm leveä, tuuletusraon lämpötila erityisesti seinän alaosassa seuraa melko tarkasti ulkoilman lämpötilaa. Seinän yläosassakin lämpötila oli vain jonkin verran alaosaa korkeampi. Tässä tapauksessa julkisivuelementin lämmöneristysominaisuutta ei pystytty esimerkiksi U-arvolaskelmissa hyödyntämään.

Seinärakenne 3B:n tuuletuskanavassa ilman lämpötila oli seinän alaosassa noin 1,5 °C ja seinän yläosassa noin 4 °C korkeampi kuin ulkoilman lämpötila, mikä kertoo siitä, että ilman liike tuuletuskanavassa oli hyvin pientä. Ilmavirtausmittaus tukee tulosta tältä osin hyvin. Siitä huolimatta seinärakenteen 3B suhteelliset kosteudet pysyivät kuitenkin koko kokeen ajan alhaisella tasolla. Tuloksista päätellen seinärakenne toimi kosteusteknisesti hyvin, vaikka ilman virtaus tuuletuskanavassa jäi hyvin pieneksi ja tuuletuskanavan lämpötilat olivat ulkoilman lämpötiloja korkeampia. Tässä tapauksessa julkisivuelementin lämmöneristyskyvyn hyödyntäminen on osittain mahdollista.

Tutkimuksen perusteella kaikkia koe-erän 2 ja niiden lisäksi seinärakenteita 3A ja 3B voidaan pitää kosteusteknisesti toimivina. On kuitenkin huomattava, että verrattuna ensimmäisen koe-erän rakenteisiin, julkisivuelementin taustapinnan suhteellisen

kosteuden mittaukset tehtiin koeseinissä 2A, 2B, 3B ja 3C lähempää rakenteen sisäpintaa, jossa lämpötila on korkeampi kuin varsinaisessa julkisivuelementin taustapinnassa. Seinärakenteissa 2A ja 3C julkisivuelementtiin oli liimattu 25 mm yhtenäistä EPS-eristettä ja seinärakenteissa 2B ja 3B 25 mm uritettua EPS-eristettä. EPS-eristeen vesihöyrynvastus oli pienempi kuin varsinaisella julkisivuelementin taustapinnan polyuretaani/ -styreeni-eristesekoituksella, jolloin suhteellinen kosteus oli kyseisen eristeen ja liimatun EPS-eristeen rajapinnassa todellisuudessa suurempi kuin nyt mitatussa liimatun EPS-eristeen sisäpinnassa. Tällä ilmiöllä ei ole kuitenkaan suurta merkitystä, koska EPS-eriste oli liimattu kiinni polyuretaani/ -styreeni-eristekerrokseen. EPS-eristeen liimaaminen julkisivun taustapinnan eristekerrokseen estää mahdollisen homeen kasvun lämmöneristeiden välisessä rajakerroksessa, koska homeen ei tiedetä kasvavan EPS-eristeen sisällä olevissa huokoisissa. Jos EPS-eristeen ja julkisivuelementin taustapinnan lämmöneristeen välinen liimaus kestää EPS-eristeen huokoihin ajoittain mahdollisesti tiivistyneen kosteuden jäätymisen ja sulamisen, rakenteen voidaan katsoa toimivan kosteusteknisesti riittävän hyvin.

Verrattuna ensimmäisen koe-erän rakenteisiin tärkeänä tekijänä koe-erien 2 ja 3 seinärakenteiden selvästi parempaan kosteustekniseen toimintaan voidaan pitää myös rakenteiden sisäpuolisen vesihöyrynvastuksen lisäämistä. Koe-erissä 2 ja 3 sisäpuolella käytetyn ilmansulkupaperin ansiosta diffuusiolla siirtyvä kosteus rakenteen läpi oli selvästi vähäisempää kuin koe-erän 1 rakenteissa. Sen lisäksi tulee ottaa huomioon, että kosteus ei päässyt ilmansulkupaperin ansiosta siirtymään rakenteeseen konvektion mukana harkkoseinässä aiemmin havaittujen epäyhtenäisten saumojen kautta. Kokeessa käytettyä ilmansulkupaperia ei kuitenkaan voida täysin verrata harkkorakenteen sisäpinnassa normaalisti käytettävän tasoite- tai rappauspinnan ja leveämmän harkon yhteiseen vesihöyrynvastukseen, koska näiden kerrosten paksuus vaikuttaa vesihöyrynvastukseen.

8 YHTEENVETO

Seinärakenteiden rakennusfysikaalisilla kokeilla oli tarkoitus selvittää Raketerm-julkisivuelementillä verhottujen seinärakenteiden rakennusfysikaalista toimivuutta suomalaisissa syys-, talvi- ja kevätolosuhteissa. Syksyjakson tarkoituksena oli selvittää miten ja kuinka nopeasti kosteutta siirtyy rakenteeseen ja voiko rakenteeseen muodostua homeenkasvun kannalta otollisia olosuhteita. Talvijaksolla tarkasteltiin rakenteiden kondensoitumisherkkyyttä ja kevätjakson tarkoituksena oli saada selvyyttä rakenteen kuivumiskyvystä.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin yhteensä yhdeksän erilaisen seinärakenteen rakennusfysikaalista toimivuutta. Osa tutkittavista seinärakenteista oli ns. umpirakenteita ja osassa seinistä tutkittiin erilaisten tuuletusratkaisujen vaikutusta seinärakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimivuuteen.

Tämän tutkimuksen perusteella seinärakenteita 1A ja 1B ei voida pitää kosteusteknisesti toimivina rakenteina. Syksyjaksolla rakenteisiin muodostui homeenkasvun kannalta otolliset olosuhteet ja talvijaksolla rakenteisiin tiivistyi nopeasti ja määrällisesti liikaa kosteutta. Myöskään seinärakenne 1C ei toiminut kokeessa kosteusteknisesti moitteettomasti. Koe-erän 1 seinärakenteiden sisäpuoleinen vesihöyrynvastus oli liian pieni suhteessa julkisivuelementin vesihöyrynläpäisevyyteen. Seinärakenteiden 1A ja 1B kosteustekninen toimivuus paransi, jos seinärakenteiden sisäpuolinen vesihöyrynvastus olisi huomattavasti suurempi, mutta siltikään niiden riittävää kosteusteknistä toimivuutta ilman tarkempia tutkimuksia on vaikea arvioida. Julkisivuelementti muodostaa joka tapauksessa seinärakenteen ulkopintaan suuren vesihöyrynvastuksen, jos julkisivun taustapintaa ei tuuleteta. Seinärakenteista 1B toimisi todennäköisesti paremmin kuin seinärakenne 1A, koska EPS-eristeen vesihöyrynvastus on mineraalivillan vesihöyrynvastukseen verrattuna selvästi suurempi.

Jotta seinärakenne 1C toimisi kosteusteknisesti paremmin, tulisi sisäpuolisen vesihöyrynvastuksen olla suurempi, mutta myös tuuletusraon tulisi olla leveämpi. Tuuletusraon suurentamisen lisäksi ilman liikettä tuuletusraossa parantaisi lämmöneristeen ulkopintaan asennettava tuulensuojakalvo, joka pienentäisi lämmöneristeessä tapahtuvaa sisäistä konvektiota. Toisaalta tuuletusraon suurentaminen heikentää rakenteen lämpötekniisiä ominaisuuksia, jolloin lämpötekniisissä laskelmissa (mm. U-arvolaskelmissa) ei julkisivun lämmöneristävyttä voida enää hyödyntää.

Tuulettumattomien seinärakenteiden 2A ja 3C parempi kosteustekninen toimivuus verrattuna koe-erän 1 rakenteisiin perustui ennen kaikkea parempaan sisäpinnan vesihöyrynvastukseen. Lisäksi julkisivun taustapintaan liimattu EPS-eriste nosti mittauskohdan lämpötilaa. Lämpötilan noustessa ja samaan aikaan huokosilman vesihöyrypitoisuuden ollessa samalla tasolla, huokosilman suhteellinen kosteus laskee. Siitä syystä seinärakenteiden 2A ja 3C julkisivun taustapinnan mittaustuloksia ei voida täysin verrata esimerkiksi koeseinien 1A ja 1B mittaustuloksiin.

Seinärakenteiden 2B, 2C ja 3B kosteustekninen toimivuus perustui rakenteiden sisäpuolisen vesihöyrynvastuksen lisäämiseen verrattuna koe-erän 1 rakenteisiin ja tämän lisäksi julkisivuelementin taustapinnan tuuletukseen. Yleisesti voidaankin sanoa, että lähes poikkeuksetta minkä tahansa ulkoseinärakenteen kosteustekninen toimivuus paranee, jos seinärakenne on tuulettuva.

Tuuletusraon ulkopuolella olevaa Raketerm-elementin taustapinnan polyuretaani/ -styreeni-lämmöneristekerrosta ei kuitenkaan voida hyödyntää laskettaessa rakenteen U-arvoa, jos julkisivuelementin taustapinta tuuletetaan ns. perinteiseen tapaan yhtenäisellä tuuletusraolla. Tämän tutkimuksen perusteella rakenteen kosteusteknistä toimivuutta voidaan parantaa esimerkiksi julkisivun taustapintaan liimattuun EPS-eristeeseen tehdyllä tuuletusurituksella. Tuuletusurituksessa ilman liikkeen havaittiin mittausten perusteella olevan kuitenkin niin pientä, että tuuletusuritusratkaisussa ei voida puhua täysin rakennetta tuulettavasta ratkaisusta. Tässä tapauksessa Raketerm-elementin lämmöneristettä voitaisiin käyttää ainakin osittain hyväksi laskettaessa rakenteen U-arvoa. Jatkotutkimusten tavoitteena onkin kehittää Raketerm-elementin taustapintaan tuuletusratkaisu, joka on riittävä rakenteen kosteusteknisen toimivuuden kannalta, mutta samalla sellainen, että Raketerm-elementin taustapinnan lämmöneristettä voidaan ainakin osittain hyödyntää laskettaessa rakenteen U-arvoa. Tämä vaatii sekä kokeellisia että laskennallisia lämpö- ja kosteusteknisiä tarkasteluja.

Tässä tutkimuksessa myös tuulettumaton seinärakenne 2A ja tietyin varauksin myös seinärakenne 3C todettiin kosteusteknisesti toimiviksi. Koska seinärakenteiden 2A ja 3C kosteustekninen toimivuus perustuu tämän tutkimuksen mukaan suurimmaksi osaksi sisäpinnan toimivaan ja riittävän suureen vesihöyrynvastukseen, tulee käytännön rakenteissa sisäpinnan vesihöyrynvastukseen kiinnittää erityistä huomiota. Tuulettumaton seinärakenne vaatii erityistä huolellisuutta koko rakenteen toteutukselta, eikä se salli todennäköisesti pieniäkään työvirheitä. Tästä syystä tuulettua seinärakennerratkaisua voidaan pitää kosteusteknisesti selvästi turvallisempänä ja riskittömämpänä.

LÄHTEET

- Asumisterveysohje. 2003. Asuntojen ja muiden oleskelutilojen fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset tekijät. Helsinki, Sosiaali- ja terveysministeriö. 93 s.
- Björkholz, D. 1997. Lämpö ja kosteus, rakennusfysiikka. Rakennustieto Oy. Saarijärvi. 150 s.
- EN ISO 13788. 2001. Hygrothermal performance of building components and building elements. Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation. Calculation methods. Brussels, European Committee for Standardization. 36 s.
- Hagentoft, C.-E. 2001. Introduction to Building Physics. Studentlitteratur, Lund, 422 s.
- Hyland, R. W. & Wexler, A. 1983. Formulations for the Thermodynamic Properties of the Saturated Phases of H₂O from 173,15 K to 473,15 K. ASHRAE Transactions, volume 89, part 2A, s.500-519.
- Iivonen, P. & Viljanen, M. 1984. Lämmön siirtyminen konvektiolla rakennuksen vaipan pinnoilla. Julkaisu 68. Helsinki, Teknillinen korkeakoulu, Rakennusinsinööriosasto, Rakennetekniikan laitos. 88 s.
- Kalamees, T. 2006. Hygrothermal Criteria for Design and Simulation of Buildings. Doctoral Thesis. Tallinn, Tallinn University of Technology. 245 s.
- Kokko, E., Ojanen, T. & Salonvaara, M. 1997. Uudet vaipparakenteet, Energian säästö ja kosteustekniikka. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1869. 90 s.
- Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen kuntotutkimus. Kuntotutkimuksen suunnittelu ja toteutus. Vaurioitumisen arviointiperusteet ja korjaustavan valinta. 1997. Ympäristöopas 28. Helsinki, Ympäristöministeriö. 143 s.
- Kosteus rakentamisessa. RakMK C2 opas. 1999. Ympäristöopas 51. Helsinki, Ympäristöministeriö. 56 s.
- Nevander, L.E. & Elmarsson, B. 1994. Fukthandbok, Praktik och teori 2nd ed. Stockholm, AB Svensk Byggtjänst. 538 s.

Ojanen, T. & Kohonen, R. 1989. Ilmavirtausten vaikutus rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 590. 106 s.

Ojanen, T., Kokko, E. & Pallari, M-L. 1993. Tuulensuojan toimintaperusteet. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1478. 125 s. + 24 liites.

Paloniitty, S. & Kauppinen, T. 2006. Rakennusten lämpökuvaus. Helsinki, Rakennusteollisuus RT ry, Rakennusteollisuuden Kustannus RTK Oy 120 s.

Pentti, M. & Hyypöläinen, T. 1999. Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen suunnittelu. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto. Julkaisu 94. 150 s. + 40 liites.

RakMK C2. 1998. Kosteus, määräykset ja ohjeet 1998. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. 7 s.

RakMK C3. 2003. Lämmöneristys, määräykset 2003. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. 7 s.

RakMK C4. 2003. Lämmöneristys, ohjeet 2003. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Helsinki, Ympäristöministeriö. 28 s.

Siikanen, U. 1996. Rakennusfysiikka. Perusteet ja sovellukset. Rakennustieto Oy. 219 s.

Viitanen, H. 1996. Factors affecting the development of mould and brown decay in wooden material and wooden structures, Effect of humidity, temperature and exposure time. Ph.D. thesis. Uppsala, The Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products. 58 s. + liitteet

Vinha, J. 2007a. Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in Finnish Climatic Conditions: A Method for Determining the Sufficient Water Vapour Resistance of the Interior Lining of a Wall Assembly. Doctoral Thesis. Tampere University of Technology, Publication 658. 338 s. + 10 liites.

Vinha, J. 2007b. Rakennusfysiikka. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. Luentomoniste kevät 2007 osat 1 ja 2.

Vinha, J. & Käckelä, P. 1999. Vesihöyryn siirtyminen seinärakenteissa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. Julkaisu 96. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka. 81 s. + 29 liites.

Vinha, J., Käkälä, P. & Kalamees, T. 2003. Puurunkoisten seinärakenteiden kosteusteknisen toiminnan vertailu omakotitalossa. Tutkimusraportti 116. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka . 54 s. + 11 liites.

Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Valovirta, I., Mikkilä, A. & Jokisalo, J., 2005a. Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys. Tutkimusraportti 131. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikka. 102 s. + 10 liitesivua.

Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A. & Käkälä, P. 2005b. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tutkimusraportti 129. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. 101 s. + 211 liites.

Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Jokisalo, J., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Aho, H., Salminen, M., Salminen, K. & Keto, M. 2008. Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Talonrakennustekniikka. Tutkimusraportti 140. Julkaistaan vuonna 2008a.

Vinha, J., Lindberg, R., Pentti, M., Mattila, J., Lahdensivu, J., Heljo, J., Suonketo, J., Leivo, V., Korpi, M., Aho, H., Lähdesmäki, K. & Aaltonen, A. 2008b. Matalaenergiarakenteiden toimivuus. Tutkimustuloksia ja suosituksia uusiin lämmöneristys- ja energiamääräyksiin ja -ohjeisiin, loppuraportti. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Talonrakennustekniikka, Tutkimusselostus Nro TRT/1706/2008. 88 s.

LIITTEET

- LIITE 1 Vesihöyryn kyllästyspitoisuuksia eri lämpötiloissa
- LIITE 2 Seinärakenteet ja mittausantureiden paikat
- LIITE 3 Valokuvat

Vesihöyryn kyllästyspitoisuuksia v_k (g/m³), eri lämpötiloissa. Taulukossa on annettu arvot -20... 30 °C lämpötila-alueella 0,1 °C välein (Nevander & Elmarsson 1994).

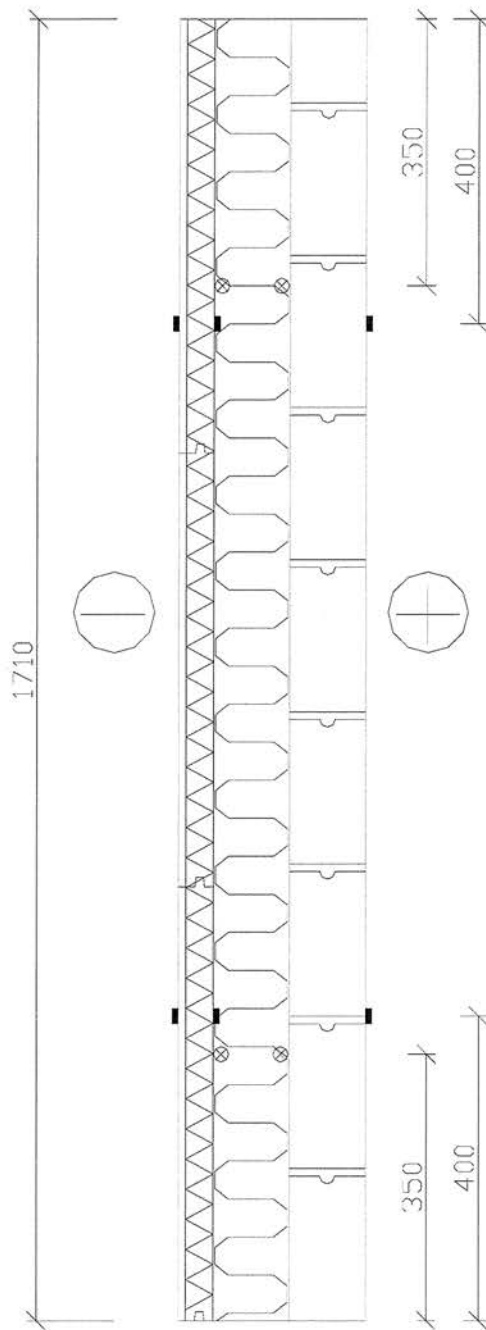
T °C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
-20	0,89									
-19	0,97	0,96	0,95	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89
-18	1,06	1,05	1,04	1,03	1,02	1,02	1,01	1,00	0,99	0,98
-17	1,16	1,15	1,14	1,13	1,12	1,11	1,10	1,09	1,08	1,07
-16	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,19	1,18	1,17
-15	1,39	1,38	1,36	1,35	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,28
-14	1,52	1,50	1,49	1,48	1,46	1,45	1,44	1,43	1,41	1,40
-13	1,65	1,64	1,63	1,61	1,60	1,58	1,57	1,56	1,54	1,53
-12	1,80	1,79	1,77	1,76	1,74	1,73	1,71	1,70	1,68	1,67
-11	1,96	1,95	1,93	1,92	1,90	1,88	1,87	1,85	1,83	1,82
-10	2,14	2,12	2,10	2,09	2,07	2,05	2,03	2,02	2,00	1,98
-9	2,33	2,31	2,29	2,27	2,25	2,23	2,21	2,20	2,18	2,16
-8	2,53	2,51	2,49	2,47	2,45	2,43	2,41	2,39	2,37	2,35
-7	2,75	2,73	2,71	2,69	2,66	2,64	2,62	2,60	2,58	2,55
-6	2,99	2,97	2,94	2,92	2,89	2,87	2,85	2,82	2,80	2,78
-5	3,25	3,22	3,19	3,17	3,14	3,12	3,09	3,07	3,04	3,02
-4	3,52	3,49	3,47	3,44	3,41	3,38	3,36	3,33	3,30	3,27
-3	3,82	3,79	3,76	3,73	3,70	3,67	3,64	3,61	3,58	3,55
-2	4,14	4,11	4,08	4,04	4,01	3,98	3,95	3,91	3,88	3,85
-1	4,49	4,45	4,41	4,38	4,35	4,31	4,28	4,24	4,21	4,17
-0	4,86	4,82	4,78	4,74	4,71	4,67	4,63	4,59	4,56	4,52
0	4,86	4,88	4,91	4,95	4,98	5,02	5,05	5,09	5,12	5,16
1	5,19	5,23	5,27	5,30	5,34	5,37	5,41	5,45	5,49	5,52
2	5,56	5,60	5,64	5,68	5,71	5,75	5,79	5,83	5,87	5,91
3	5,95	5,99	6,03	6,07	6,11	6,16	6,20	6,24	6,28	6,32
4	6,36	6,41	6,45	6,49	6,54	6,58	6,62	6,67	6,71	6,76
5	6,80	6,85	6,89	6,94	6,99	7,03	7,08	7,12	7,17	7,22
6	7,27	7,31	7,36	7,41	7,46	7,51	7,56	7,61	7,66	7,71
7	7,76	7,81	7,86	7,91	7,96	8,01	8,07	8,12	8,17	8,22
8	8,28	8,33	8,38	8,44	8,49	8,55	8,60	8,66	8,71	8,77
9	8,83	8,88	8,94	9,00	9,05	9,11	9,17	9,23	9,29	9,35
10	9,41	9,47	9,53	9,59	9,65	9,71	9,77	9,83	9,89	9,96
11	10,02	10,08	10,15	10,21	10,27	10,34	10,40	10,47	10,53	10,60
12	10,67	10,73	10,80	10,87	10,94	11,00	11,07	11,14	11,21	11,28
13	11,35	11,42	11,49	11,56	11,63	11,71	11,78	11,85	11,92	12,00
14	12,07	12,15	12,22	12,29	12,37	12,45	12,52	12,60	12,68	12,75
15	12,83	12,91	12,99	13,07	13,15	13,23	13,31	13,39	13,47	13,55
16	13,63	13,71	13,80	13,88	13,96	14,05	14,13	14,22	14,30	14,39
17	14,48	14,56	14,65	14,74	14,83	14,91	15,00	15,09	15,18	15,27
18	15,36	15,46	15,55	15,64	15,73	15,83	15,92	16,01	16,11	16,20
19	16,30	16,39	16,49	16,59	16,69	16,78	16,88	16,98	17,08	17,18
20	17,28	17,38	17,49	17,59	17,69	17,79	17,90	18,00	18,11	18,21
21	18,32	18,42	18,53	18,64	18,75	18,85	18,96	19,07	19,18	19,29
22	19,41	19,52	19,63	19,74	19,86	19,97	20,08	20,20	20,31	20,43
23	20,55	20,67	20,78	20,90	21,02	21,14	21,26	21,38	21,50	21,63
24	21,75	21,87	22,00	22,12	22,25	22,37	22,50	22,63	22,75	22,88
25	23,01	23,14	23,27	23,40	23,53	23,66	23,80	23,93	24,06	24,20
26	24,33	24,47	24,61	24,74	24,88	25,02	25,16	25,30	25,44	25,58
27	25,72	25,86	26,01	26,15	26,30	26,44	26,59	26,73	26,88	27,03
28	27,18	27,33	27,48	27,63	27,78	27,93	28,09	28,24	28,39	28,55
29	28,71	28,86	29,02	29,18	29,34	29,50	29,66	29,82	29,98	30,14
30	30,31	30,47	30,64	30,80	30,97	31,14	31,30	31,47	31,64	31,81

SEINÄRAKENNE 1A

SEINÄ 1A ULKOJA SISÄLLE

- Raketerm-elementti 46mm (tiili-laatta 9mm+lämmoneriste 37mm)
- Kivivilla 100 mm
- Kevytsojarahkko 100mm

- = Pintalämpötila-anturi
- ⊗ = Lämpötila-/ RH-anturi

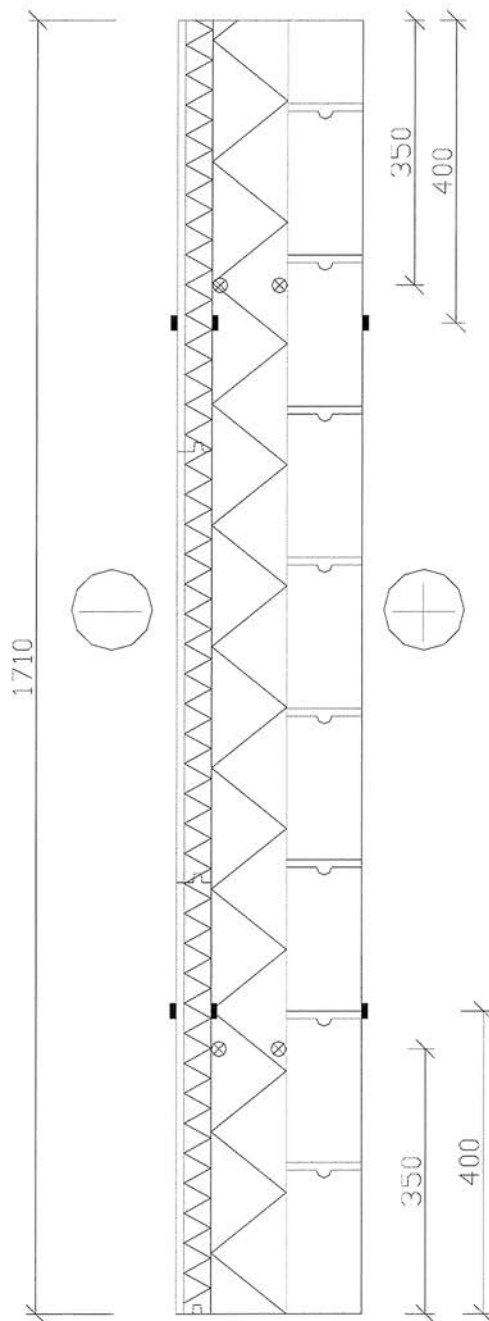


SEINÄRAKENNE 1B

SEINÄ 1B ULKOA SISÄLLE:

- Raketerm-elementti 46mm (tiilllaatta 9mm+lämmöneriste 37mm)
- EPS 100 mm
- Kevytsooraharkko 100mm

- = Pintalämpötila-anturi
- ⊗ = Lämpötila-/ RH-anturi



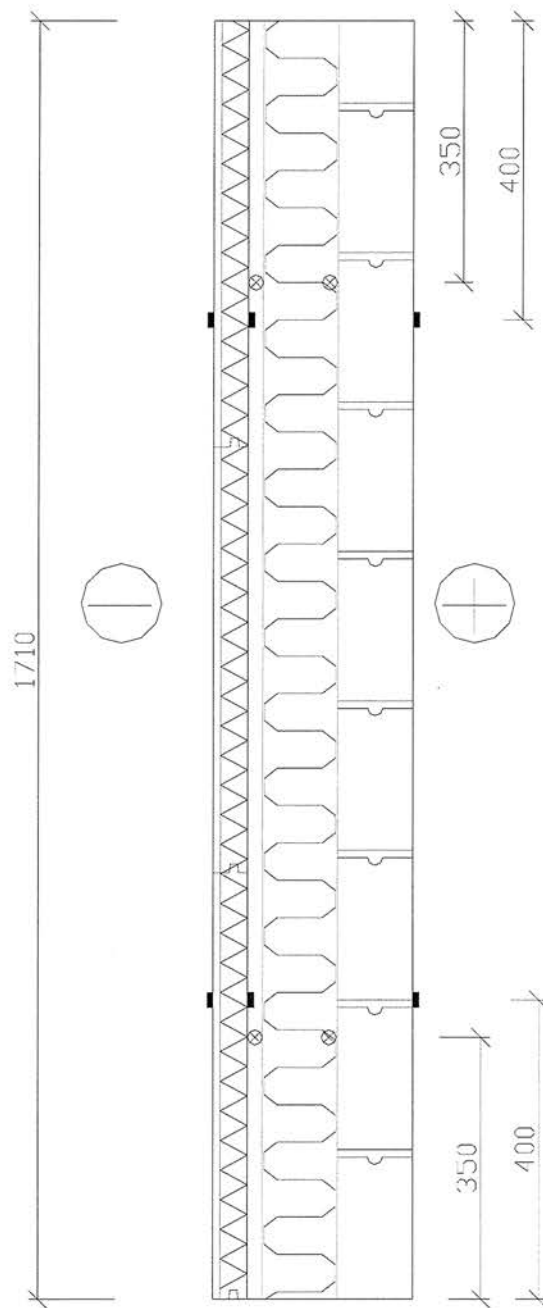
SEINÄRAKENNE 1C

SEINÄ 1C ULKOA SISÄLLE:

- Raketerm-elementti 46mm (tiililaatta 9mm+lämmöneriste 37mm)
- Tuuletusrako 10 mm
- Kivivilla 100 mm
- Kevytsoharkko 100mm

■ = Pintalämpötila-anturi

⊗ = Lämpötila-/ RH-anturi

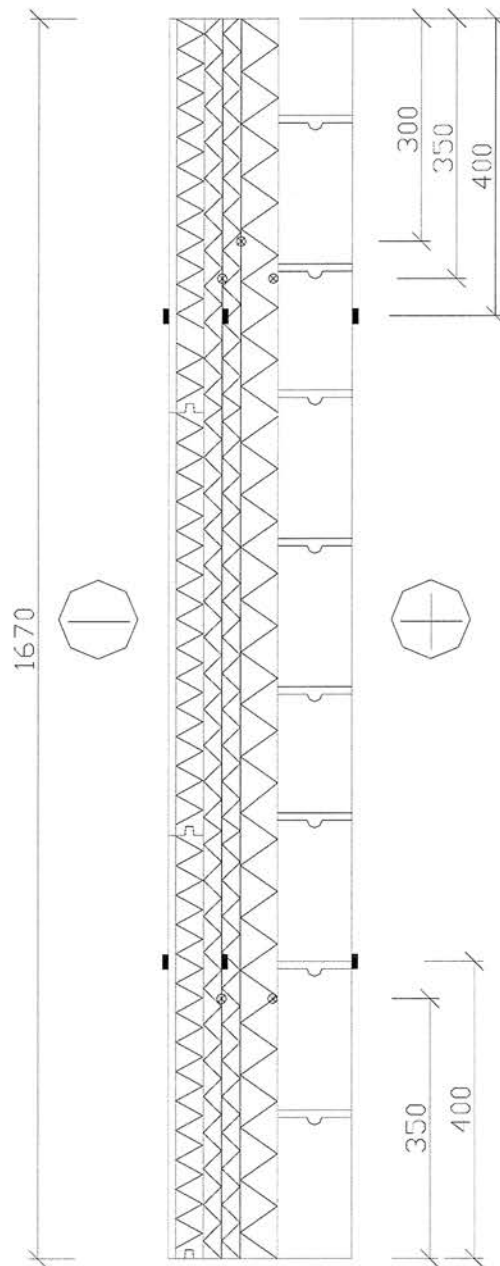


SEINÄRAKENNE 2A

SEINÄ 2A ULKOA SISÄLLE

- Raketerm-elementti 46mm (tiililaatta 9mm+lämmöneriste 37mm)
- EPS 25mm liimattuna Raketerm-elementtiin
- EPS 25mm (irtonaisena)
- EPS 50mm (irtonaisena)
- Kevytsoharkko 100mm
- Ilmansulkupaperi

- = Pintaämpötila-anturi
 ⊗ = Lämpötila-/ RH-anturi



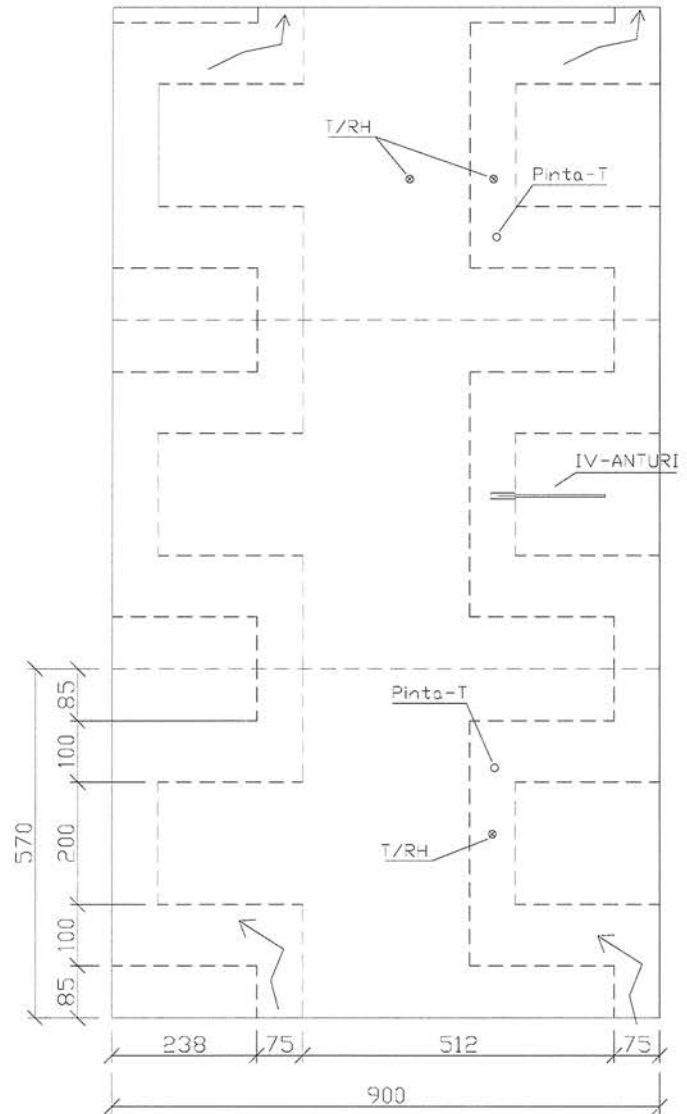
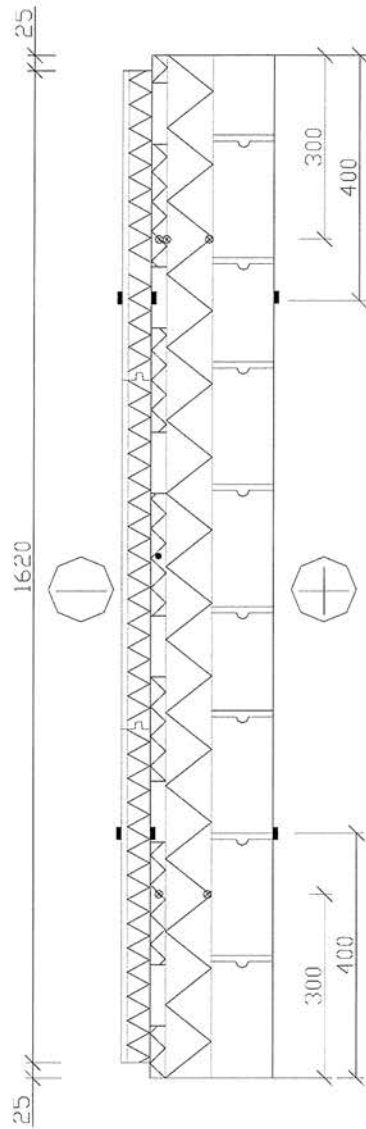
SEINÄRAKENNE 2B

SEINÄ 2B ULKOA SISÄLLE:

- Raketerm-elementti 46mm (tilillaatta 9mm+lämmöneriste 37mm)
- S-uritettu EPS-eriste 25mm liimattuna Raketerm-elementtiin
- EPS-eriste 75mm (intonaisena)
- Kevytscräpärkki 100mm
- Ilmansulkupaperi

- tai ○ = Pintalämpötila-anturi
- ⊗ = Lämpötila- / RH-anturi
- = IV-anturi

PROJEKTIOKUVA TUULETUSURITUKSEN
KOHDALTA



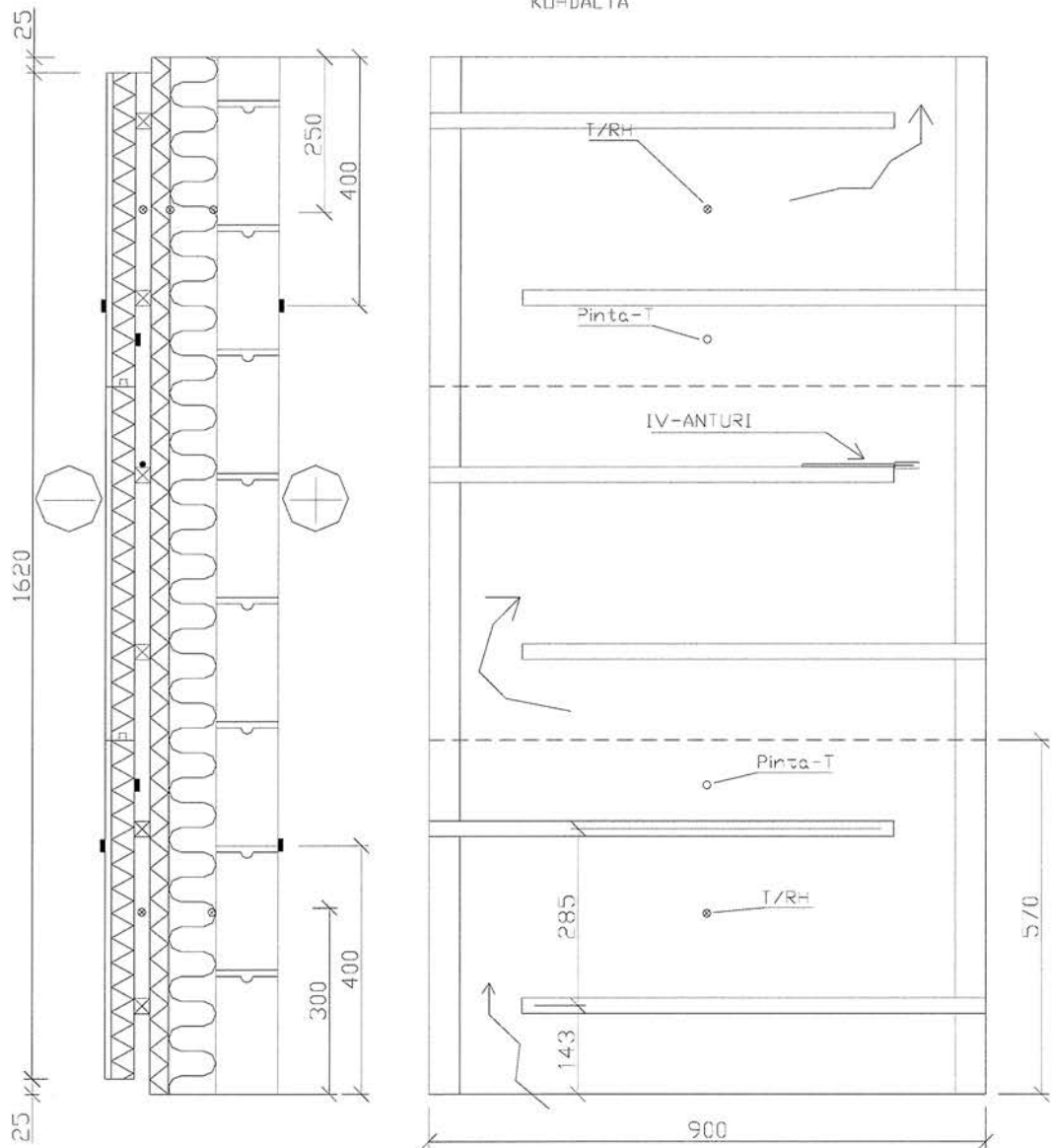
SEINÄRAKENNE 2C

SEINÄ 2C ULKOJA SISÄLLE

- Raketerm-elementti 46mm (tillilaatta 9mm+lämmoneriste 37mm)
- Tuuletusrako 25 mm + 25x25mm2 puurimat l=700 (myös reunilla)
- Tuulensuojalevy 30mm
- Kivivilia 75 mm
- Kevytsohaharkko 100mm
- Ilmansulkupaperi

- tai ○ = Pinta-ämpötila-anturi
- ⊗ = Lämpötila-/ RH-anturi
- = IV-anturi

PROJEKTIOKUVA TUULETUSRIMOITUKSEN KOHDALTA

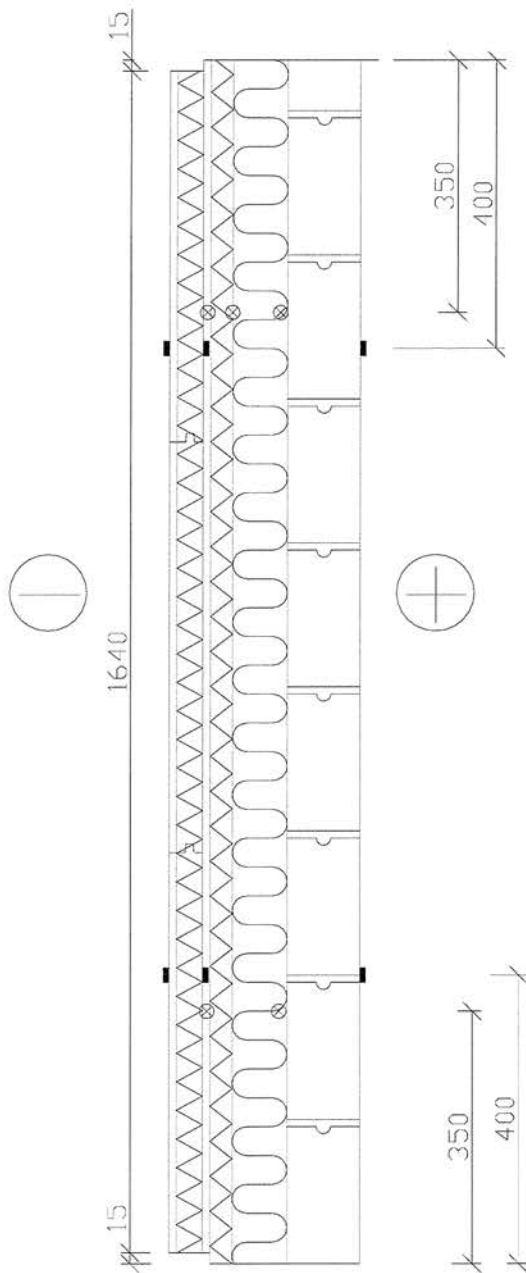


SEINÄRAKENNE 3A

SEINÄ 3A ULKOA SISÄLLE

- Raketerm-elementti 46mm (tiililaatta 9mm+lämmöneriste 37mm)
- Tuuletusrako 10 mm
- Tyvek-pintainen tuulensuojalevy 30 mm
- Kivivilla 75 mm
- Kevytsohoharkko 100mm
- Ilmansulkupaperi

- = Pintalämpötila-anturi
- ⊗ = Lämpötila-/ RH-anturi

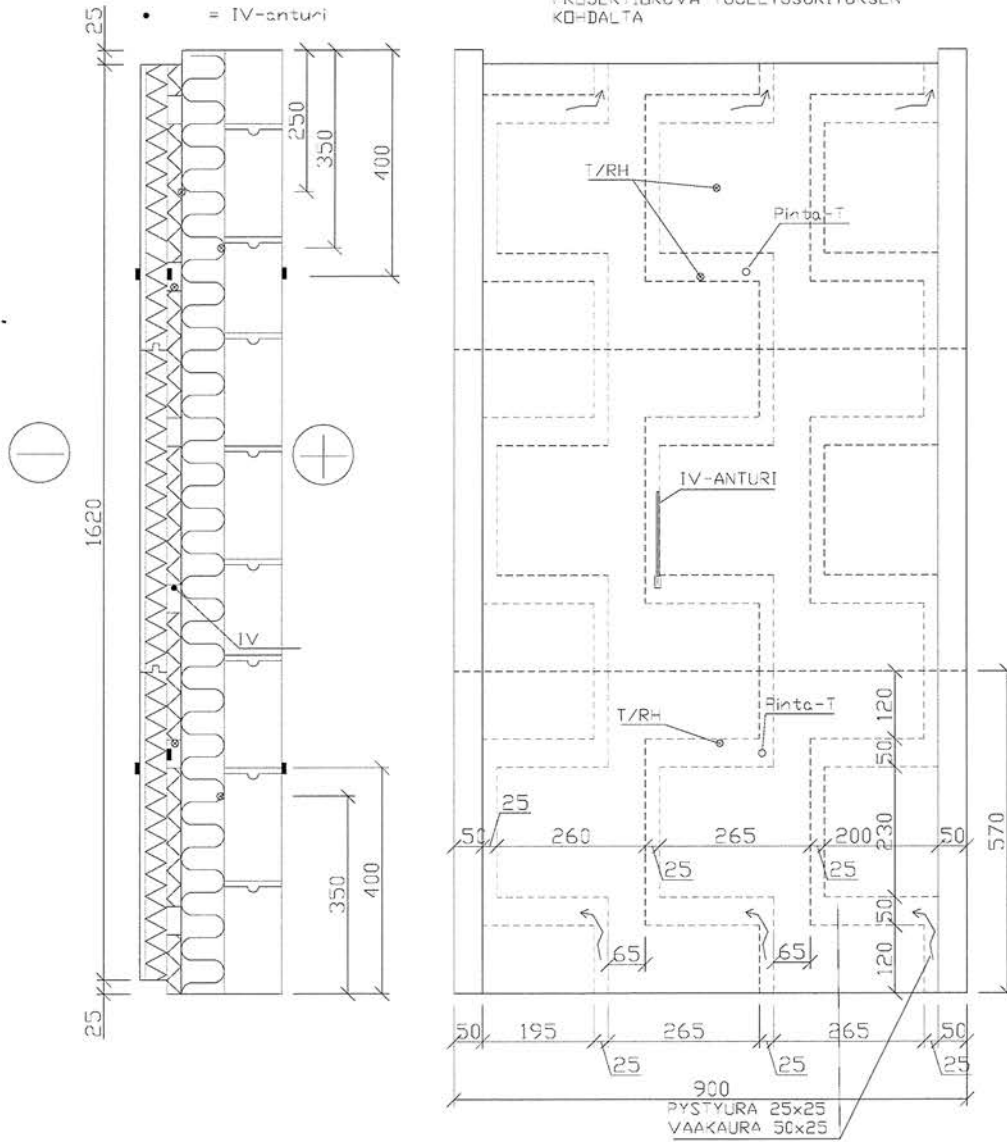


SEINÄRAKENNE 3B

SEINÄ 3B ULKOJA SISÄLLE

- Raketerm-elementti 46mm (tilllaatta 9mm-lämmeneriste 37mm)
- S-uritettu EPS-eriste 25mm liimattuna Raketerm-elementtiin
- Tyvek-tuulensuojakaiva (lisäetty talvijaksolla)
- Kivivilja 75mm
- Kevytsoharkkko 100mm
- Ilmansulkupaperi

- tai ○ = Pintalämpötila-anturi
- ⊗ = Lämpötila-/ RH-anturi
- = IV-anturi

PROJEKTIOKUVA TUULETUSURITUKSEN
KO-DALTA

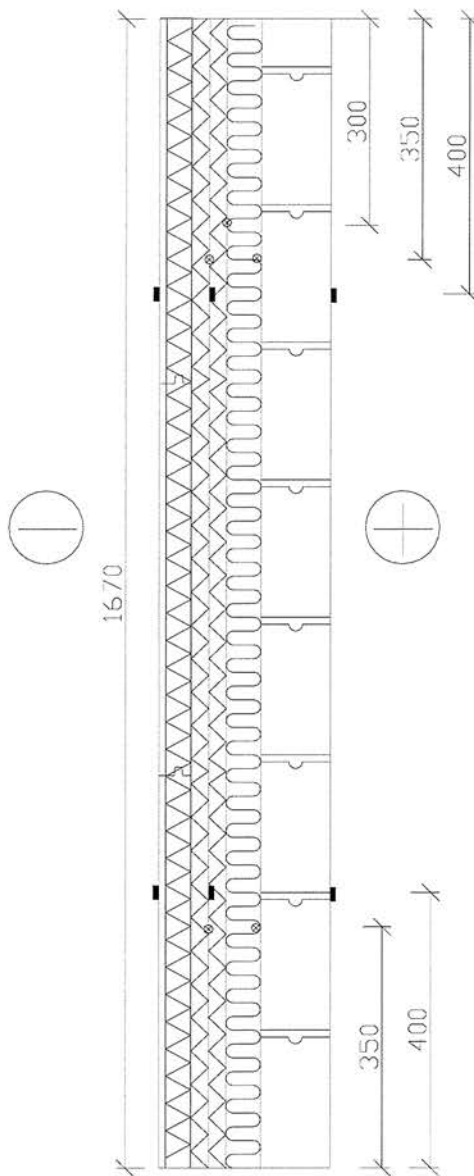
SEINÄRAKENNE 3C

SEINÄ 3C ULKOA SISÄLLE

- Raketerm-elementti 46mm (tiililaatta 9mm+lämmöneriste 37mm)
- EPS-eriste 25mm liimattuna Raketerm-elementtiin
- EPS-eriste 25mm (intonaaisena)
- Kivivilla 50 mm
- Kevytsohaharkko 100mm
- Ilmansulkupaperi

■ = Pintalämpötila-anturi

⊗ = Lämpötila-/ RH-anturi





Kuva 1. Harkkoseinä asennettuna säärasituslaitteistoon. Kuvassa harkon sisäpinnassa olevat lämpövirtalevyt seinien keskiosalla ja harkon sisäpinnan pintalämpötila-anturit seinien ylä- ja alaosissa.



Kuva 2. Koe-erän 1 seinärakenteet kuvattuna asennusvaiheessa ulkopuolelta, kun lämmöneristeet on asennettu jokaiseen seinärakenteeseen.



Kuva 3. Koe-erän 1 seinärakenteet asennusvaiheessa. Seinärakenteisiin 1A ja 1B on jo asennettu Raketerm-julkisivuelementit.



Kuva 4. Raketerm-julkisivuelementti asennettuna. Kuvan oikeassa reunassa näkyvällä muovilla estettiin kosteuden vaakasuuntainen siirtyminen seinärakenteesta toiseen.



Kuva 5. Seinärakenteiden sisäpinta koe-erissä 2 ja 3. Harkon sisäpinnassa on yhtenäinen ilmasulkupaperi. Kuvassa näkyy myös jokaisen rakenteen lämpövirtalevy.



Kuva 6. Kuvassa näkyy seinän 2A yläosan lämpötila-/ RH-anturi, jota varten lämmöneristeeseen kolottiin asennusura.



Kuva 7. Seinärakenne 2A. Sisältä (kuvassa oikealta) päin katsottuna: Harkko (näkyv huonosti muovin takana), EPS-eriste 50 mm, EPS-eriste 25 mm, EPS-eriste 25 mm liimattuna julkisivuelementtiin ja tiililaattapintainen Raketerm-julkisivuelementti.



Kuva 8. Seinärakenteen 2B julkisivuelementin tausta, jossa 25 mm:n paksuiseen elementin taustapintaan liimattuun EPS-eristeeseen on tehty tuuletusuritus. Kuvassa näkyy myös ilmavirtausmittari, jolla mitattiin tuuletusurituksessa kulkevan ilman nopeutta. Ilmavirtausmittari kolottiin EPS-eristeeseen.



Kuva 9. Seinärakenteen 2C tuulensuojalevyn pintaan asennetut puurimat, joilla tehtiin tuuletusrako julkisivuelementin ja tuulensuojalevyn väliin.



Kuva 10. Kuvassa seinärakenteet 3B (vasemmalla) ja 3C (oikealla). Kuva on otettu kokeen jälkeen rakenteiden purkuvaiheessa. Seinärakenteessa 3B on näkyvissä Tyvek-tuulensuojakalvo, joka lisättiin rakenteeseen talvijaksolla. Seinän 3C yläosassa on näkyvissä kivivilla, seinän keskiosassa on näkyvissä sen päälle asennettu EPS-eriste ja ulkopinnassa alaosassa oleva Raketerm-julkisivuelementti.



Kuva 11. Seinärakenne 3B:n julkisivuelementin tausta, jossa 25 mm:n paksuiseen elementin taustapintaan liimattuun EPS-eristeeseen on tehty tuuletusuritus. Uritus on samanmallinen Suritus, kuin seinärakenteen 2B julkisivussa, mutta uritus on dimensioiltaan pienempi ja jakoväliltään tiheämpi.



Kuva 12. Ennen kokeiden aloitusta julkisivuelementtien väliset vaakasaumat saumattiin laastilla.